Tradução

W. WEBER R. KOHLRAUSCH[1]

Sobre os efeitos das correntes elétricas (segunda parte) – Tradução comentada da primeira obra de Ampère sobre eletrodinâmica

On the effects of electric currents (second part) – Commented translation of the first work of Ampère related to electrodynamics

Tradução de
JOÃO PAULO MARTINS DE CASTRO CHAIB
ANDRÉ KOCH TORRES ASSIS
Universidade Estadual de Campinas | UNICAMP

RESUMO Apresentamos a tradução comentada da segunda parte da primeira obra de A. M. Ampère sobre os fenômenos eletrodinâmicos. Nesse artigo Ampère descreve suas observações da ação entre correntes elétricas e suas consequências qualitativas.

Palavras-chave Ampère; eletrodinâmica; eletromagnetismo.

ABSTRACT *We present a commented Portuguese translation of the second part of the first work of A. M. Ampère related to the electrodynamic phenomena. In this article Ampère describes his observations of the action between electric currents and their qualitative consequences.*

Key words *Ampère; electrodynamics; electromagnetism.*

Introdução

Esta é uma tradução da segunda parte do primeiro trabalho publicado por Ampère (1775-1836) voltado para a eletrodinâmica, intitulado "Sobre os efeitos das correntes elétricas".[1] Esse trabalho foi apresentado à Academia em 26 de dezembro de 1820.[2]

Nessa segunda parte, Ampère aprofunda a analogia que faz dos fenômenos magnéticos e eletromagnéticos com os fenômenos eletrodinâmicos, iniciada na primeira parte do artigo. Na primeira parte, introduziu os conceitos necessários para a discussão dessa analogia e apresentou a experiência onde mostrou a atração e a repulsão entre condutores paralelos conduzindo correntes constantes. Na segunda, apresenta as várias experiências que realizou para justificar sua hipótese de que os fenômenos magnéticos e eletromagnéticos podem ser reduzidos a fenômenos

eletrodinâmicos. Apresenta também as surpresas que encontrou ao longo do desenvolvimento do seu trabalho, assim como as conclusões que obteve a partir delas.

Ampère inicia essa segunda parte descrevendo o que podemos chamar de "experiência de Oersted eletrodinâmica". Em sua experiência original, Oersted observou uma agulha imantada sendo defletida de sua direção original ao longo do meridiano magnético pelo torque causado por um longo fio retilíneo conduzindo uma corrente constante. Em sua alteração dessa experiência, Ampère substitui a agulha imantada por uma espira circular conduzindo uma corrente constante. Para Ampère, uma agulha imantada seria análoga a um conjunto de espiras circulares com corrente constante, sendo o plano dessas espiras ortogonal ao eixo magnético da agulha, isto é, ao eixo que une os polos da agulha imantada.

Para uma melhor compreensão do texto, apresentamos aqui as experiências na ordem em que se encontram no trabalho. Ao lado, indicamos a data em que essas experiências foram apresentadas nas sessões da Academia de Ciências da França:

• Atração e repulsão entre fios retilíneos com correntes constantes (descrita na primeira parte deste trabalho). Apresentada em 9 de outubro de 1820.

• Experiência de Oersted eletrodinâmica. Apresentada em 9 de outubro de 1820.

• Agulha eletrodinâmica. Apresentada em 6 de novembro de 1820.

• Ímãs eletrodinâmicos paralelos. Apresentada em 6 de novembro de 1820.

• Atração e repulsão entre condutores retilíneos inclinados entre si, utilizando um disco graduado indicando o ângulo de inclinação. Apresentada a Biot e a Gay-Lussac em 17 de outubro de 1820.

• Ação diretriz (torque) da terra sobre uma espira circular conduzindo corrente constante. Apresentada em 30 de outubro de 1820.

• Agulha imantada astática. Apresentada em 25 de setembro de 1820.

• Atrações e repulsões de um ímã causadas por um fio retilíneo com corrente constante. Apresentada em 25 de setembro de 1820.

• Atrações e repulsões entre um condutor espiral conduzindo corrente constante e um ímã, ou entre duas espirais com corrente. Apresentada em 25 de setembro de 1820.

Esse trabalho nunca foi traduzido para o português. Mesmo para o inglês existe apenas uma tradução parcial realizada por O. M. Blunn.[3]

Segue a tradução da segunda parte de seu trabalho "Sobre os efeitos das correntes elétricas." Tanto as notas do autor [N. A.] como as dos tradutores [N. T.] encontram-se no final do trabalho. Nas notas do autor indicamos qual é o número da nota no original para facilitar sua identificação pelo leitor. Isto é, usamos [N. A. m] para indicar a nota "m" de Ampère. As palavras entre colchetes no meio do texto são dos tradutores, incluídas para facilitar a compreensão de algumas frases. Também colocamos entre colchetes o início de cada página do original. Mantivemos a numeração original das Figuras, que seguem a numeração da primeira parte deste trabalho. A Figura 1 apareceu na primeira parte deste trabalho. Ela é reproduzida aqui por ser mencionada várias vezes no texto.

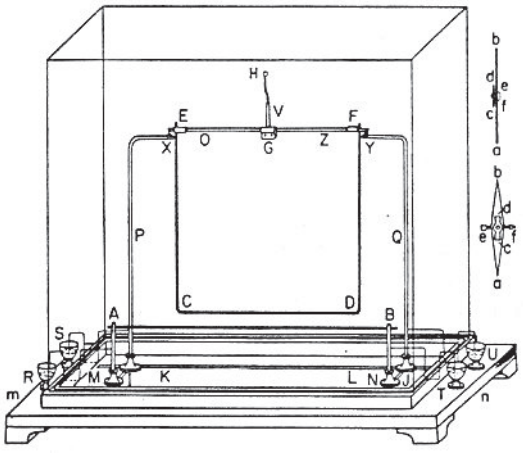


Figura 1

Embora a Figura 5 não seja mencionada no texto, ela é incluída aqui por aparecer no artigo original.

Achamos provável que esta Figura se refira ao instrumento mencionado por Ampère na página 193 do artigo original. Teríamos então uma espira retangular de lados $BC = 30$ cm e $CD = 60$ cm que pode girar livremente ao redor do eixo horizontal GH. Pode-se imaginar que a pilha seria ligada às taças U e T. Supondo que a corrente entre em U, ela seguiria o trajeto $USABCDEFGQ$, saindo em T e se ligando ao terminal negativo da bateria. Caso a espira retangular $ABCDEF$ esteja inicialmente em repouso em um plano horizontal, ao passar uma corrente constante no circuito vem que ela se inclinaria em relação à horizontal devido a sua interação com o magnetismo terrestre, até atingir uma nova posição de equilíbrio. Nessa nova posição de equilíbrio, o plano da espira retangular ficaria ortogonal ao eixo de uma agulha imantada de inclinação. Isto é, o plano $ABCDEF$ ficaria paralelo ao plano do equador da agulha de in-clinação. Com essa experiência, Ampère estaria reproduzindo de maneira eletrodinâmica (ou seja, utilizando apenas uma espira com corrente, sem nenhum ímã) o comportamento magnético de uma agulha imantada de inclinação.

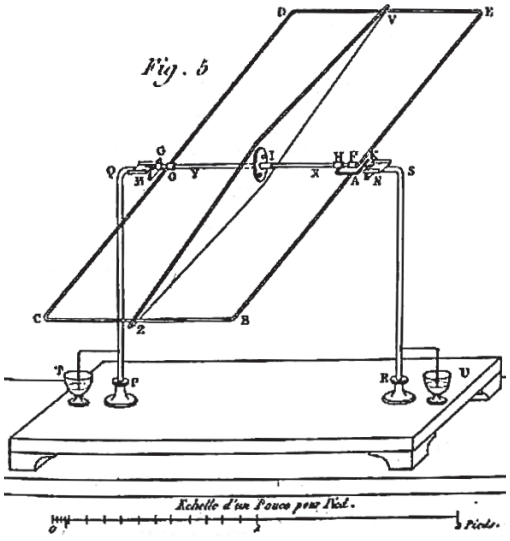


Figura 5

Após esta breve introdução passamos à tradução do artigo de Ampère.

Tradução

[Pág. 170]

Sequência da Memória sobre a ação mútua entre duas correntes elétricas, entre uma corrente elétrica e um ímã ou o globo terrestre, e entre dois ímãs.

Pelo Sr. Ampère.

Continuação da Parte I.

Antes de descrever as experiências que fiz sobre a ação mútua entre uma corrente elétrica e o globo terrestre ou um ímã, antes de deduzir as consequências que – considerando os ímãs como conjuntos de correntes elétricas dispostas como acabo de dizê-lo[4] – reconduzem esta ação, bem como a da terra sobre um ímã, ou de dois ímãs um sobre o outro, à ação mútua entre duas correntes elétricas, que será objeto dos parágrafos seguintes – creio ter o dever de completar o que acabo de dizer [na primeira parte deste trabalho] sobre esta última ação expondo os novos resultados que obtive desde a impressão do que precede, e que comuniquei à Academia de Ciências, em duas

[Pág. 171]

memórias, uma que foi lida em 9 de outubro [de 1820] e a outra em 6 de novembro [de 1820].

A primeira experiência que adicionei às que acabo de descrever foi feita com o instrumento apresentado na Figura 2.

A corrente elétrica, chegando neste instrumento pelo apoio *CA* (Figura 2), percorre primeiramente o condutor *AB*, retornando pelo apoio *BDE*; deste apoio – pela pequena taça de aço *F*, onde se coloca uma gota de mercúrio, e no qual gira o pivô de aço do eixo de vidro *GH*[5] – a corrente comunica-se ao encaixe de cobre *I* e ao condutor *KLMNOPQ*, cuja extremidade *Q* mergulha no mercúrio que está em contato com a outra extremidade da pilha. Com as coisas assim dispostas, fica claro que, na situação em que este condutor está representado em que o punha primeiramente apoiando-o contra o apêndice *T* do primeiro condutor, a corrente da parte *MN* estava [fluía] no sentido contrário ao de *AB*, enquanto que quando a fazíamos descrever uma semi-circunferência *KLMNOPQ*, as duas correntes encontravam-se [fluíam] no mesmo sentido.

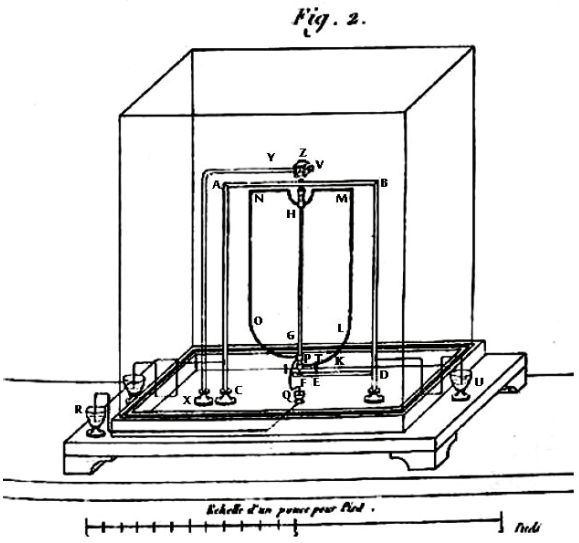


Figura2

Vi então ser produzido o efeito que esperava. No instante em que o circuito foi fechado, a parte móvel do aparelho girou pela ação mútua entre esta parte e o condutor fixo *AB*, até [o ponto em que] as correntes, que estavam inicialmente em sentido contrário, se colocassem de maneira a ficarem paralelas e [fluindo] no mesmo sentido. A velocidade adquirida [pela parte móvel do aparelho] fazia-lhe exceder desta última posição; mas ela voltava, passava ligeiramente além [do ponto de equilíbrio], e terminava por fixar-se após algumas oscilações.

[Pág. 172]

A maneira como concebo o ímã – como um conjunto de correntes elétricas em planos perpendiculares à linha que une os polos – fez-me primeiro procurar imitar a ação [do ímã] utilizando condutores curvados de forma helicoidal, em que cada espira representava uma corrente disposta como a de um ímã. Minha primeira ideia foi que a obliquidade destas espiras poderia ser negligenciada quando tinham pouca distância entre elas. Não tinha prestado atenção ao fato de que, à medida que esta distância diminui, o número de espiras, para um comprimento dado, aumenta na mesma proporção e que, consequentemente, como percebi mais tarde, o efeito desta obliquidade continua sendo sempre o mesmo.

Anunciei, na Memória lida na Academia em 18 de setembro, a intenção de que construiria hélices feitas de fio de latão para imitar todos os efeitos do ímã, seja de um ímã fixo com uma hélice fixa, seja de uma agulha imantada com uma hélice enrolada ao redor de um tubo de vidro suspenso pelo meio sobre uma ponta muito fina como a agulha de uma bússola.[6] Esperava que não somente as extremidades desta hélice fossem atraídas ou repelidas como os polos de uma agulha [magnetizada], pelos polos de uma barra imantada, mas que também fosse orientada pela ação do globo terrestre. Tive êxito completo em relação à barra imantada, mas em relação à ação diretriz da terra, o aparelho não tinha mobilidade suficiente – e esta força agia

[Pág. 173]

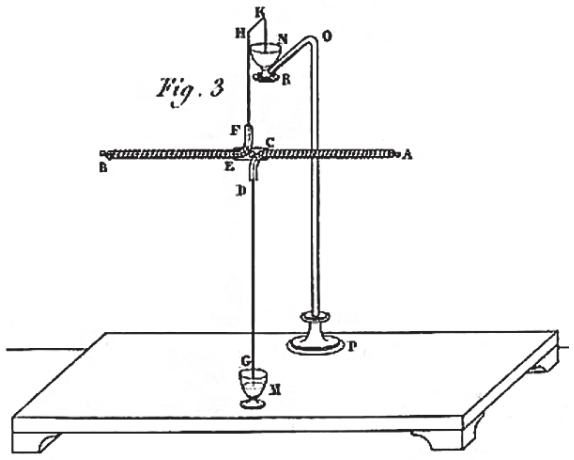


Figura 3

por um braço de alavanca demasiado curto para produzir o efeito desejado. Só obtive este último efeito algum tempo depois, com a ajuda dos aparelhos que serão descritos no parágrafo seguinte. O fio de latão que forma a hélice que construí, era enrolado em torno de dois tubos de vidro *ACD* e *BEF* (Figura 3), prolonga-se de uma extremidade [de um tubo] à outra [extremidade do outro tubo], retornando pelo interior destes tubos, e suas duas extremidades saem em *D* e *F*. Uma parte, *DG*, desce verticalmente, a outra é dobrada como se vê em *FHK*. Os dois [fios] terminam em pontas de aço submersas em mercúrio contido em duas taças pequenas *M* e *N*, e postos em contato com as duas extremidades da pilha, a ponta superior apoiando somente contra o fundo da taça *N*. Não preciso dizer que entre as duas extremidades desta agulha feita de uma hélice elétrica, a extremidade que se encontra à direita das correntes [elétricas] é a que apresenta, no que diz respeito à barra imantada, os fenômenos fornecidos pelo polo austral de uma agulha de bússola, e a outra [extremidade apresenta os fenômenos] do polo boreal.

Em seguida fiz ser construído um aparelho semelhante ao da Figura 1, no qual o condutor fixo e o condutor móvel eram trocados por hélices de latão enroladas em tubos de vidro, mas tal que os prolongamentos, ao invés de retornar pelos tubos, eram postos em contato com as duas extremidades da pilha, como os condutores retilíneos da Figura 1.[7] Foi fazendo uso deste instrumento que descobri um fato novo que de início não me pareceu estar de acordo com os
122 outros fenômenos que tinha observado até então na ação mútua entre duas correntes elétricas, ou entre uma corrente e um ímã. Mais tarde reconheci

[Pág. 174]

que este fato novo não contraria o conjunto destes fenômenos; mas que é necessário, para explicar [este fato], admitir como uma lei geral da ação mútua entre correntes elétricas, um princípio que verifiquei apenas no que diz respeito às correntes em fios metálicos curvados em formas helicoidais, mas que creio ter validade geral, em relação às porções infinitamente pequenas de corrente elétrica das quais deve-se conceber estar composta toda corrente de uma grandeza finita, quando se deseja calcular os efeitos, quer [a corrente elétrica percorra] uma linha reta ou uma curva.[8]

Para se ter uma ideia nítida desta lei, é necessário conceber no espaço uma linha que representa em grandeza e direção a resultante de duas forças que são representadas similarmente por duas outras linhas, e supor, nas direções destas três linhas, três porções infinitamente pequenas de correntes elétricas, cujas intensidades sejam proporcionais aos seus comprimentos.[9] Esta lei consiste em que a pequena porção de corrente elétrica, direcionada de acordo com a resultante, exerce, em qualquer direção que seja, sobre uma outra corrente ou sobre um ímã, uma ação atrativa ou repulsiva igual à que resultaria, na mesma direção, da união das duas porções de correntes direcionadas de acordo com as componentes. Concebe-se facilmente porque tem de ser assim, no caso onde se considera a corrente em um fio condutor curvado em forma helicoidal em relação às ações que exerce paralelamente ao eixo da hélice e em planos perpendiculares a este eixo, pois a razão [*rapport* no original em francês] da resultante e das componentes é a mesma para cada arco infinitamente pequeno desta curva, bem como a razão das ações produzidas pelas porções de correntes elétricas

[Pág. 175]

correspondentes, de onde segue que esta última razão existe também entre as integrais destas ações. Para os outros casos, se a lei da qual acabamos de falar é verdadeira para duas componentes relativas à sua resultante, não pode deixar de sê-lo para um número qualquer de forças relativas à resultante de todas estas forças, como se vê facilmente, aplicando-se esta abordagem sucessivamente a duas das forças dadas, em seguida à resultante [destas duas primeiras forças] e a uma outra destas forças, e seguindo sempre o mesmo [procedimento] até chegar à resultante de todas as forças dadas. Segue do que acabamos de dizer relativamente às correntes elétricas em fios curvados em forma helicoidal, que a ação produzida pela corrente de cada espira se compõe de duas outras [ações]: uma será produzida por uma corrente paralela ao eixo da hélice – representado em intensidade pela altura desta espira[10] – e a outra por uma corrente circular representada pela seção feita perpendicularmente a este eixo na superfície cilíndrica sobre a qual encontra-se a hélice. E como a soma das alturas de todas as espiras, [altura esta] tomada paralelamente ao eixo da hélice, é necessariamente igual a este eixo [ou seja, é igual ao comprimento deste eixo], resulta que além da ação produzida pelas correntes circulares transversais, que comparei à [ação] de um ímã, a hélice produz ao mesmo tempo a mesma ação que uma corrente de igual intensidade [produziria se] existisse ao longo de seu eixo.

Se o fio condutor retornar por este eixo que forma a hélice, ao passar dentro de um tubo de vidro colocado nesta hélice para isolá-lo das espiras que compõem a hélice, a corrente desta parte retilínea do fio condutor estará em sentido contrário da corrente que equivaleria à parte da ação da hélice que ocorre parale-

[Pág. 176]

lamente ao seu eixo, [o fio condutor retilíneo dentro do tubo] repelirá o que esta [parte retilínea equivalente da hélice] atrairia, e atrairá o que esta repeliria. Consequentemente, esta última ação será destruída pela porção retilínea do condutor. E somente resultará da união deste [fio retilíneo] com a hélice, apenas a ação das correntes circulares transversais, perfeitamente semelhantes à [ação] de um ímã. Esta união existia no instrumento representado na Figura 3, sem que eu tivesse previsto as vantagens, e é por isso que [este instrumento] me apresentou exatamente os efeitos de um ímã, e que as hélices onde uma porção retilínea do condutor não retornava pelo eixo, me apresentaram, além disso, os efeitos de um condutor retilíneo igual ao eixo destas hélices.[11] Como o raio das superfícies cilíndricas sobre as quais [a hélice] se encontra era bastante pequeno[12] nas hélices que utilizei, eram os efeitos no sentido longitudinal que ficavam mais perceptíveis – fenômeno que muito me surpreendeu antes que eu tivesse descoberto sua causa. Ainda estava pesquisando a explicação [para este fenômeno], e queria, através de novas experiências, estudar todas as circunstâncias deste fenômeno, que havia observado inicialmente na ação entre dois condutores curvados em hélice e, em seguida, na ação entre um condutor desta forma e uma agulha imantada, quando o Sr. Arago observou [esta ação] neste último caso, antes que eu tivesse falado com ele. Estas hélices, em que o fio volta retilineamente pelo eixo, serão preciosos instrumentos para pesquisa, não somente porque elas oferecem o mesmo tipo de ação que os ímãs, quando as espiras possuem um pequeno passo,[13] mas também porque se tiverem um passo grande, ter-se-á um condutor aproximadamente adinâmico [isto é, que não exerça ações dinâmicas sobre outros condutores ou sobre ímãs], para levar e trazer a corrente elétrica sem que

[Pág. 177]

exista o perigo que as correntes que se encontrem nesta porção do condutor alterem os efeitos das outras partes do circuito, nas quais estar-se-ia observando ou medindo a ação.

Podemos também imitar exatamente os fenômenos do ímã por meio de um fio condutor curvado como na Figura 4, onde existe entre todas as porções do condutor que se encontram no sentido no eixo, a mesma compensação que existe nas hélices que acabamos de falar, entre a ação da porção retilínea do condutor e aquela que as espiras exercem em sentido contrário paralelamente ao eixo da hélice.

Percebemos que neste instrumento o fio de latão que está dentro do tubo *BH* é o prolongamento do fio que forma os anéis circulares *E*, *F, G*, etc., e que cada anel é ligado ao seguinte por um pequeno arco de hélice em que cada espira teria uma grande altura em relação ao raio da superfície cilíndrica sobre a qual ela se encontra.

A ação que estes pequenos arcos de hélice – que estão designados na Figura pelas letras *M, N, O*, etc. – exercem paralelamente ao eixo do tubo, sendo igual e oposta à ação da porção *AB* do condutor, faz com que permaneçam apenas, neste aparelho, as ações nos planos perpendiculares ao eixo do tubo, e aquelas que os pequenos arcos *M, N, O*, etc. produzem nestes planos – estas últimas sendo muito fracas. Os efeitos obtidos nas experiências feitas com este instrumento serão aquelas dos anéis *E, F, G*, etc.[14]

Desde as minhas primeiras pesquisas sobre o assunto com o qual estamos nos ocupando, tenho tentado encontrar a lei de acordo

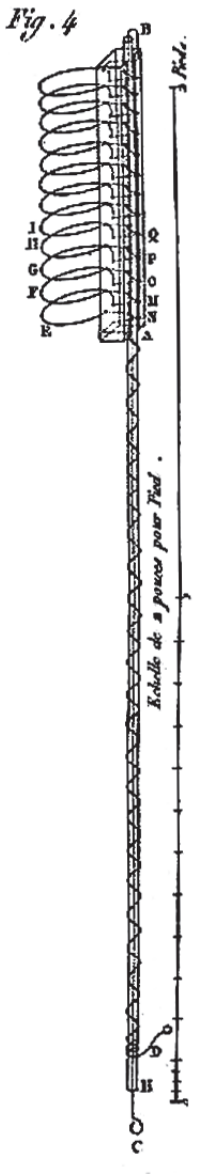


Figura 4

[Pág. 178]

com a qual varia a ação atrativa ou repulsiva entre duas correntes elétricas, no momento em que mudam de valor a distância entre elas e os ângulos que determinam suas posições respectivas. Logo me convenci de que não era possível descobrir esta lei a partir da experiência, pois ela só pode ter uma expressão simples se considerarmos porções de corrente cujo comprimento seria infinitamente pequeno, e não podemos realizar experiências com estas correntes [infinitesimais]. A ação entre as correntes que se pode medir os efeitos é a soma das ações infinitamente pequenas destes elementos [de corrente], soma que só podemos obter por duas integrações sucessivas, em que uma [integral] deve ser feita sobre toda a extensão de uma das correntes para um mesmo ponto da outra [corrente], e a segunda [integral] efetua-se sobre o resultado da primeira [integral] compreendida entre os limites marcados pelas extremidades da primeira corrente, sobre toda a extensão da segunda [corrente]. É somente o resultado desta última integração, compreendida entre os limites marcados pelas extremidades da segunda corrente, que pode ser comparado com os dados da experiência. De onde segue, como disse na Memória lida à Academia no último dia 9 de outubro [de 1820], que estas integrações são a primeira coisa com as quais se deve ocupar no momento em que se deseja determinar, inicialmente, a ação mútua entre duas correntes de tamanho finito, sejam retilíneas, sejam curvilíneas – prestando atenção que, em uma corrente curvilínea, a direção das porções [de corrente] nas quais é composta [a corrente] é determinada, em cada ponto, pela tangente à curva a qual ela pertence. Em seguida [deve-se ocupar com a interação de] uma corrente elétrica com um ímã, ou entre dois ímãs, um sobre o outro, considerando, nestes dois últimos casos, os ímãs como conjuntos de correntes elétricas dispostas como

124

[Pág. 179]

disse acima. De acordo com uma bela experiência do Sr. Biot, as correntes situadas em um mesmo plano perpendicular ao eixo do ímã devem ser consideradas como possuindo a mesma intensidade, pois resulta desta experiência, onde ele comparou os efeitos produzidos pela ação da terra sobre duas barras [magnetizadas], de mesmo tamanho, de mesma forma e imantadas da mesma maneira, onde uma é oca e a outra não, que a força motriz era proporcional à massa. Consequentemente, as causas segundo as quais esta ação era devida, agiam com a mesma intensidade sobre todas as partículas de uma mesma seção [reta] perpendicular ao eixo. Além disso, a intensidade variava de uma seção reta à outra conforme estas [seções] estavam distantes ou próximas dos polos. Quando o ímã é um sólido de revolução ao redor da linha que une os dois polos, todas as correntes de uma mesma seção reta devem, além do

mais, ser círculos. Isto fornece um meio para simplificar os cálculos relativos aos ímãs desta forma, calculando de início a ação de uma porção infinitamente pequena de uma corrente elétrica sobre um conjunto de correntes circulares concêntricas ocupando todo o espaço fechado sobre uma superfície de um círculo, de maneira que as intensidades que lhes são atribuídas no cálculo sejam proporcionais à distância infinitamente pequena de duas correntes consecutivas medidas sobre um raio, dado que sem esta consideração o resultado da integração dependeria do número de partes infinitamente pequenas nas quais teria se dividido este raio pelas circunferências que representam as correntes, o que é absurdo. Como uma corrente circular é atraída, na parte onde [esta corrente] flui no sentido da corrente que age sobre ela, e repelida na parte onde ela flui em

[Pág. 180]

sentido contrário, a ação sobre uma superfície circular perpendicular ao eixo do ímã consistirá em uma [força] resultante igual à diferença entre as atrações e repulsões decompostas paralelamente a esta resultante, e em um torque resultante que as atrações e repulsões tenderão igualmente a produzir. Encontrar-se-á o valor por integrações relativas aos raios das correntes circulares, que deverão ser tomadas desde zero até o raio da superfície quando o ímã é cheio, e entre os raios das superfícies interna e externa, quando o ímã é um cilindro oco. Será necessário então multiplicar o resultado desta operação:

1º. Pela espessura infinitamente pequena da seção reta e pela intensidade comum às correntes das quais é composta a seção transversal.

2º. Pela intensidade e pelo comprimento de uma porção infinitamente pequena da corrente elétrica que se supõe agir sobre ela.

E teremos assim os valores da [força] resultante e do torque resultante que compõem a ação elementar entre uma seção circular ou na forma de uma arruela, e uma porção infinitamente pequena desta corrente.

Através deste valor, caso se trate da ação mútua entre um ímã e uma corrente, seja retilínea de um comprimento finito, seja curvilínea, para encontrar esta ação mútua teremos apenas de executar as integrações que serão necessárias para o cálculo da [força] resultante e do torque resultante de todas as ações elementares entre cada seção do ímã e cada porção infinitamente pequena da corrente elétrica.

Mas caso se trate da ação mútua entre dois ímãs cilíndricos, ocos ou sólidos, ter-se-á inicialmente que re-

[Pág. 181]

tomar o valor da [ação] entre uma seção transversal circular ou em forma de arruela, e uma porção infinitamente pequena de corrente elétrica, para deduzir, por duas integrações, a ação mútua entre esta seção transversal [de um ímã] e uma seção semelhante [do segundo ímã], ao considerar esta seção transversal como composta de correntes circulares, dispostas como na primeira [seção transversal do primeiro ímã]. Ter-se-á assim a [força] resultante e o torque resultante da ação mútua entre duas seções infinitamente finas,[15] e por novas integrações,[16] serão obtidas as mesmas coisas relativas à interação entre dois ímãs compreendidos em superfícies de revolução, depois contudo que se tenha determinado pela comparação entre os resultados dos cálculos e os [dados] experimentais, de acordo com qual função da distância de cada seção transversal a um dos polos do ímã, varia a intensidade das correntes elétricas desta seção reta. Ainda não terminei os cálculos relativos à ação entre um ímã e uma corrente elétrica, nem relativos à ação mútua entre dois ímãs,[17] mas somente aqueles pelos quais determinei a ação mú-

[Pág. 182]

tua entre duas correntes retilíneas com um comprimento finito, [supondo] a hipótese que concorda melhor com

os fenômenos que tenho observado e os resultados experimentais gerais relativos ao valor de atração ou de repulsão que existe entre duas porções infinitamente pequenas de correntes elétricas. Tinha planejado inicialmente publicar esta fórmula e suas diversas aplicações somente quando pudesse comparar os resultados [dos cálculos teóricos] às experiências [feitas] com medidas precisas. Mas depois de considerar todas as circunstâncias que presumem os fenômenos, acreditei ver, em favor desta hipótese, suficiente probabilidade para dar um resumo desde já, e este será o objeto de um dos parágrafos seguintes.

Fiz ser construído para estas experiências, um instrumento que mostrei no último dia 17 de outubro [de 1820] aos Srs. Biot e Gay-Lussac, e que só difere do [instrumento] representado na Figura 1 no fato de que o condutor fixo deste último foi substituído por um condutor preso a um círculo que podia girar em torno de um eixo horizontal perpendicular à direção do condutor móvel, por meio de uma polia de reenvio, e graduada de modo que se veja sobre sua borda o ângulo formado pelas direções das duas correntes, nas diferentes posições que se pode dar sucessivamente para o condutor sustentado pelo círculo graduado.[18]

Não desenhei este aparelho nas figuras anexas a esta Memória, pois conservando a mesma disposição para este último condutor, e ao colocar o condutor em uma posição vertical, tenho construído o aparelho representado na Figura 6, que é muito mais apropriado para fazer exatamente as medidas que tenho em vista,[19] sobretudo a partir do momento em que dei ao suporte do círculo gra-

[Pág. 183]

duado, além do movimento pelo qual se pode afastá-lo ou aproximá-lo do condutor móvel – por meio de um parafuso ajustável – dois outros movimentos, um vertical e outro no sentido horizontal e perpendicular à direção dos outros dois. O primeiro dos três movimentos é indispensável para toda medida a ser feita com o instrumento – este movimento já existia em meu primeiro aparelho – os dois [outros] movimentos que adicionei, têm o objetivo de facilitar a realização das medidas no caso em que a linha que une os pontos médios das duas correntes não está perpendicular a elas. É por isso que pensei que se poderia deixar de regular [os dois condutores] com o parafuso de ajuste, e fazer isto à mão antes da experiência, desde que em seguida o círculo graduado pudesse ser fixado de uma maneira estável na posição desejada.

Este é o novo instrumento que representei na Figura 6 e vou explicar sua construção. Se aqui falo do primeiro [instrumento], é porque foi com ele que observei, pela primeira vez, a ação do globo terrestre sobre as correntes elétricas, que alterava os efeitos da ação mútua entre dois condutores que tinha a intenção de medir. Então, interrompi estas observações e fiz serem construídos os dois aparelhos que colocam em evidência esta ação da terra, e com os quais produzi igualmente, com correntes elétricas, os movimentos correspondentes à direção da bússola no plano horizontal, seguindo a linha de declinação, e à direção da agulha de inclinação no plano do meridiano magnético. Estes últimos instrumentos e as experiências que fiz com eles serão descritos

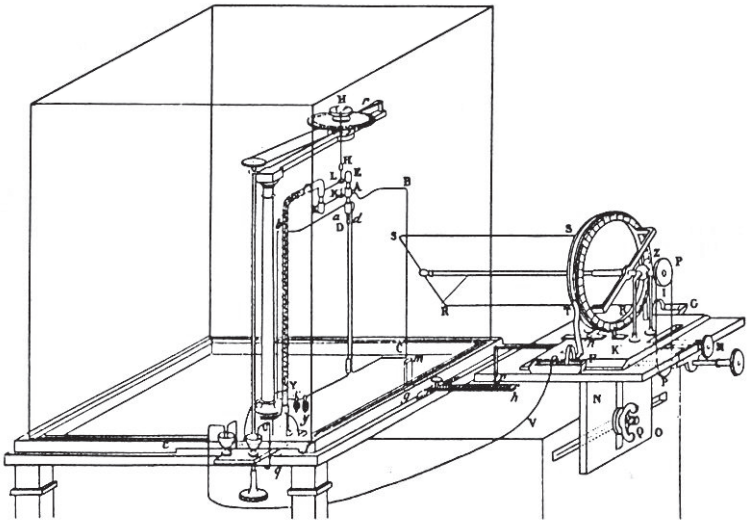


Figura 6

[Pág. 184]

no parágrafo seguinte, tal como estavam na Memória que li perante a Academia de Ciências no último dia 30 de outubro [de 1820]. Regressemos ao aparelho para medir a ação entre duas correntes elétricas em todas as posições possíveis e que está representado na Figura 6.

Os três movimentos do suporte *KFG* acontecem da seguinte maneira: O primeiro com a ajuda do parafuso ajustável *M*, os outros dois através de uma peça de madeira *N* sobre a qual o suporte é fixado, podendo deslizar nos dois sentidos, horizontal e vertical, sobre outra peça de madeira *O* fixada no pé do instrumento. Em uma [direção] é feita uma fenda horizontal, na outra uma fenda vertical, e na intersecção das direções destas duas fendas, encontra-se uma porca *Q* que serve para segurar a peça móvel de modo que fique presa na peça fixa na posição que se deseja. O movimento de rotação do círculo graduado por meio do qual se pode inclinar à vontade a porção do fio condutor unida ao círculo, é executado através das duas polias de retorno *P* e *P'*. Para que a terra não exerça sobre o condutor móvel qualquer ação que se combine com a ação do condutor fixo, compus a primeira de duas partes iguais e opostas *ABCd* e *abcDE*, lhes dando a forma que se vê na Figura. E para que essas duas extremidades pudessem ser postas em contato com as extremidades da pilha, o condutor móvel é interrompido no ângulo *A* do fio de suspensão *HH'*, cuja torção deverá equilibrar-se com a atração ou com a repulsão das duas correntes. O braço *BA* se prolonga além de *A*, e o braço *DE* além de *F*, e eles terminam nos pontos *K* e *L*, que mergulham em pequenas taças cheias de mercúrio, porém sem encostar no fundo.

[Pág. 185]

O suporte que segura estas duas pequenas taças – elas podem ser de ferro ou de platina – pode ser avançado ou recuado por meio da porca *a*, que fixa o suporte na ranhura *ef*. Uma destas taças está em contato com uma das extremidades da pilha pelo condutor *XU* envolto por um tubo de vidro em torno do qual envolve-se de forma helicoidal o condutor *YVT*, terminado por um tipo de mola de cobre, que se apóia em *T* sobre a circunferência do círculo graduado, onde ele se encontra em contato com um círculo de fio de latão em contato com o trecho *SS'* do condutor cuja parte *SR* está destinada a agir sobre o condutor móvel, e onde o trecho *RR'* tende para um segundo círculo de fio de latão sobre o qual se apóia em *Z* uma mola *ZI* semelhante à primeira [mola], e que se comunica pelo lado de *I*, com a outra extremidade da pilha. Fica claro que girando o círculo graduado em torno do eixo horizontal que o suporta, a parte *SR* do condutor girará em um plano vertical, de maneira a formar todos os ângulos que se desejar com a direção da parte *BC* do condutor móvel, sobre a qual ela age através da caixa de vidro onde está contido este condutor móvel, para que não possa sofrer interferência da agitação do ar.

Para medir as atrações e repulsões entre dois condutores a distâncias diferentes – quando estão paralelos entre si e a linha que une seus centros seja ortogonal aos dois condutores – gira-se o eixo vertical ao qual está preso o fio de suspensão, de modo que a parte *BC* do condutor móvel corresponda ao zero da escala *gh*. Isto se obtém colocando esta parte imediatamente abaixo do bisel que termina a peça de cobre *m* – uma marca

[Pág. 186]

np, presa em *n* ao suporte do círculo graduado, indica sobre esta escala a distância entre as duas porções do condutor, *BC* e *SR*. No momento em que estabelecemos a comunicação das duas extremidades do circuito com as extremidades da pilha, a primeira [parte do condutor] *BC* move-se para frente ou para trás conforme é atraída ou repelida por *SR*; mas [em seguida] traz-se [o fio *BC*] para a posição onde se encontrava anteriormente fazendo girar o eixo do fio de suspensão. O número das voltas e partes de volta marcadas pelo índice *r* sobre o quadrante *pq* unido à este eixo, fornece o valor da atração ou da repulsão entre as duas correntes elétricas, [valor este] medido pela torção do fio.

Não é preciso recordar aos físicos acostumados a fazer medidas deste tipo, que a intensidade das correntes varia incessantemente com a energia da pilha. Faz-se necessário – entre cada experiência a diferentes distâncias – realizar uma medida em uma [dada] distância constante, a fim de conhecer pela [variação da] ação observada em cada vez [que medir] a esta distância constante – e [utilizando] as regras comuns de interpolação – como varia a intensidade das correntes [em função do tempo], e qual é o seu valor à cada momento. O mesmo procedimento deve ser adotado para comparar as atrações e repulsões em uma distância constante quando se faz variar o ângulo entre as direções das duas correntes, no caso em que se mantém constantemente perpendicular às duas correntes a linha que une seus centros. As observações intermediárias – aquelas cujo objetivo é determinar por interpolação a energia da pilha a cada momento – serão então mais fáceis pois, mantendo com um valor constante a distância entre as duas porções de condutor *BC* e *SR*, será suficiente girar o círculo graduado a cada vez para fazer com que *SR* fique paralela à direção de *BC*.

[Pág. 187]

Finalmente, quando se quiser medir a ação mútua entre *BC* e *SR* quando a linha que une seus centros não se encontra perpendicular às suas direções, coloca-se o suporte do círculo graduado em uma posição conveniente por meio da porca *Q* que fixa o suporte ao resto do aparelho na posição que se deseja dar-lhe. Realizando uma série de experiências semelhantes àquelas do caso precedente, podem ser comparados os resultados obtidos em cada situação dos condutores de correntes elétricas ao que acontecia quando a linha que une os centros lhes é perpendicular – fazendo esta comparação para uma mesma distância mais curta entre as correntes e, em seguida, para distâncias diferentes. Ter-se-á assim tudo o que é necessário para ver como, e até que ponto, estas diversas circunstâncias influenciam na ação mútua das correntes elétricas. Só faltará observar se o conjunto destes resultados estará de acordo com o cálculo dos efeitos que devem ser produzidos em cada circunstância, de acordo com a lei de atração que se admitirá entre duas porções infinitamente pequenas de correntes elétricas.

128 Pela adição de um outro condutor móvel cuja suspensão é exatamente a mesma, e que está representado à parte na Figura 10, onde as partes correspondentes são designadas pelas mesmas letras, tornei este instrumento próprio também para medir o torque das forças que tendem a girar um condutor, pela ação de um outro condutor que forma sucessivamente diferentes ângulos com [o condutor original] aos quais correspondem torques diferentes. Este condutor móvel *ABOCDEF* tem a forma que vemos na Figura 10, e se encontra sus-

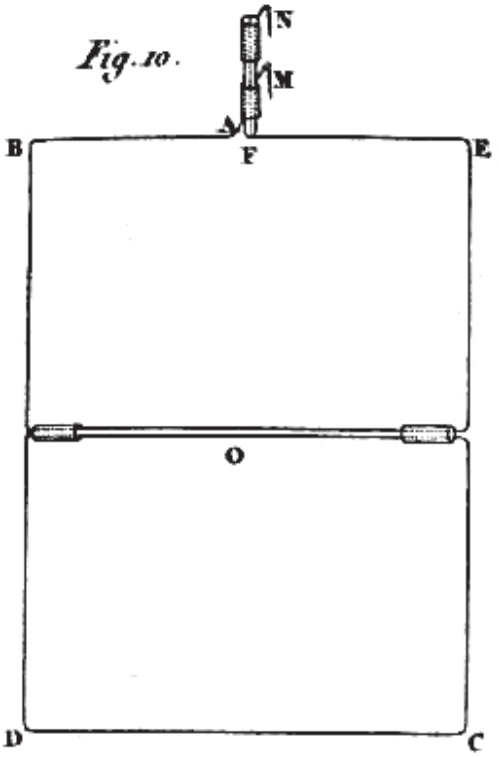


Figura 10

[Pág. 188]

penso pelo meio de seu lado superior horizontal – estando contido entre os pontos *A* e *F* – onde as duas extremidades deste condutor possuem as duas pontas de aço *M* e *N*, que estão situadas em uma mesma linha vertical, e mergulham no mercúrio contido nas pequenas taças da Figura 6, sem tocar no fundo devido à suspensão do fio de torção. Para medir o torque de rotação produzido por um condutor retilíneo, coloca-se um [condutor retilíneo] sob a caixa de vidro extremamente perto do lado horizontal inferior *CD* (Figura 10) do condutor móvel, de maneira que ele corresponda a seu centro. Este último [condutor móvel] gira devido à ação do condutor fixo sem ser influenciado pela ação da terra, porque existe a compensação entre as ações que ela exerce sobre as metades iguais e opostas do condutor móvel.[20]

II. Orientação das correntes elétricas pela ação do globo terrestre[21]

Não tive êxito nas primeiras experiências em mover o fio condutor de uma corrente elétrica pela ação do globo terrestre. Talvez [este insucesso tenho sido causado] menos pela dificuldade de obter uma suspensão bem móvel, do que pelo fato de, em vez de procurar na teoria que relaciona os fenômenos magnéticos às correntes elétricas a disposição mais favorável a este tipo de ação, eu estava preocupado com a ideia de imitar da melhor

[Pág. 189]

forma possível a disposição das correntes elétricas do ímã no arranjo das correntes sobre o qual queria observar a ação da terra. Tinha sido guiado apenas por esta ideia na construção do instrumento representado na Figura 3. Esta ideia me impediu de notar que não é de toda forma, mas apenas de maneira indireta, que esta ação leva o polo austral da agulha imantada ao norte e para baixo, e o polo boreal ao sul e para cima. [Esta ideia também me impediu de notar] que o seu efeito imediato é o de colocar os planos perpendiculares ao eixo do ímã – nos quais encontram-se as correntes elétricas de que o ímã é composto – paralelamente a um plano determinado pela ação resultante de todas estas [correntes elétricas] de nosso globo, e que é, em cada lugar, perpendicular à agulha de inclinação. Segue desta consideração que não é uma linha reta, mas um plano que a ação terrestre deve imediatamente direcionar. Assim o que precisa ser imitado, é a disposição da eletricidade seguindo o equador da agulha imantada, equador que é uma curva entrando nela mesma e ver, em seguida, se no momento em que uma corrente elétrica está assim disposta, a ação da terra tende a levar o plano onde se encontra [a corrente elétrica] em uma direção paralela à direção para a qual ela tende a levar o equador do ímã. Ou seja, em uma direção perpendicular ao [eixo da] agulha de inclinação, de maneira que a corrente que se tenta direcionar desta forma esteja [fluindo] no mesmo sentido que [as correntes da] agulha imantada que obedeceu à ação do globo terrestre.

O ímã move-se diferentemente se ele somente puder girar no plano horizontal como no caso da agulha de uma bússola, ou [se ele somente puder girar] no plano do meridiano magnético, como no caso da agulha de inclinação presa a

[Pág. 190]

um eixo horizontal e perpendicular ao meridiano magnético. Para imitar estes dois movimentos e imprimir movimentos análogos a uma corrente elétrica, é necessário que o plano no qual se encontra [esta corrente] seja, no primeiro caso, vertical como o plano do equador de uma agulha imantada horizontal, e gire ao redor da [linha] vertical que passa pelo seu centro de gravidade. E no segundo caso, [é necessário] que o plano só possa, como o equador da agulha de inclinação, girar ao redor de uma linha compreendida neste plano que seja, ao mesmo tempo, horizontal e perpendicular ao meridiano magnético.

Coloquei primeiramente nestas duas posições uma dupla espiral de cobre que me pareceu muito adequada para representar as correntes elétricas do equador de um ímã. E vi este aparelho mover-se quando estabeleci uma corrente elétrica nele, precisamente como teria feito, no primeiro caso, o equador da agulha de uma bússola e, no segundo caso, o [equador] de uma agulha de inclinação. Mas ocorreu comigo a mesma coisa que ao Sr. Oersted. Em suas experiências, a força diretriz da corrente elétrica que agia sobre uma agulha imantada tendia a colocá-la em uma direção que fizesse um ângulo reto com a [direção da] corrente. Mas ele nunca obteve um desvio de cem graus[22] deixando o fio condutor na direção do meridiano magnético, porque a ação do globo terrestre ao se combinar com a da corrente elétrica, faz com que a agulha imantada se direcione ao longo da resultante destas duas ações. Nas experiências feitas com as espirais duplas, a força diretriz [isto é, o torque] da terra era contrariada, no primeiro caso, pela torção do fio de suspensão deste instrumento e, no segundo caso,

[Pág. 191]

por seu peso, porque o centro de gravidade não podia estar situado exatamente na linha horizontal em torno da qual girava a espiral dupla.

Deduzi então que multiplicando o número das espiras de que a espiral era composta, não se aumentava desta maneira o efeito produzido pela ação da terra, porque a massa a ser movida aumentava proporcionalmente à força motriz. De onde concluí que obteria mais simplesmente os mesmos fenômenos de orientação empregando, para representar o equador de uma agulha imantada, uma só corrente elétrica que retorna sobre ela mesma, e formando um circuito se este não é absolutamente fechado – pois era impossível de estabelecer a corrente no fio de cobre sem ao menos deixar uma interrupção [pequena] suficiente para conectar suas duas extremidades com as extremidades da pilha.

Ao mesmo tempo compreendi que a forma do circuito era irrelevante, desde que todas as partes estivessem em um mesmo plano, dado que era um plano que se tratava de direcionar.

Fiz então com que fossem construídos dois aparelhos. Em um aparelho o fio condutor tem a forma de uma circunferência *ABCD* (Figura 7), cujo raio tem um pouco mais de dois decímetros. As duas extremidades do fio de latão de que é formada esta circunferência são soldadas a dois recipientes de cobre, *E* e *F*, presos a um tubo de vidro *Q*, e que possuem duas pontas de aço, *M* e *N*, mergulhando no mercúrio contido nas duas pequenas taças de platina, *O* e *P*, e [onde] somente a [ponta] superior *N* atinge o fundo da taça *P*. Estas duas taças são apoiadas pelos encaixes de cobre *G* e *H*, que se comunicam com as duas extremidades

[Pág. 192]

da pilha por meio de dois condutores de fio de latão. Um [destes condutores de fio de latão] passa dentro do tubo
130 de vidro que tem estes dois últimos encaixes, e serve de apoio ao instrumento, e o outro [condutor] forma ao redor deste tubo uma hélice cujas espiras possuem uma grande altura [passo] em relação ao diâmetro do tubo, para que as ações exercidas pelas duas porções de correntes que percorrem estes condutores em sentido contrário neutralizem-se quase que completamente. Coloquei sob a caixa de vidro – que cobre este instrumento para protegê-lo das agitações do ar – um outro círculo de fio de latão, com diâmetro ligeiramente maior, que é fixo e sustentado por um apoio semelhante ao do círculo móvel, na situação que se vê na Figura. Este círculo comunica-se também com dois condutores dispostos da mesma maneira, e que servem para fazer passar [ao longo deles] a corrente elétrica quando, ao invés de observar a ação do globo terrestre sobre o círculo móvel, se quer ver os efeitos de duas correntes circulares, uma sobre a outra. Quando se deseja observar a ação que a terra exerce sobre uma corrente elétrica, faz-se passar esta corrente apenas no círculo móvel. Como a questão aqui é somente da ação do globo terrestre, falarei apenas do caso onde os condutores do círculo móvel estão em contato somente com as duas extremidades da pilha. O círculo fixo então serve apenas para indicar de maneira precisa o plano vertical e perpendicular ao meridiano magnético, onde o círculo móvel deve ser conduzido pela ação da terra. Inicialmente coloca-se o círculo fixo neste plano através de uma bússola, e [coloca-se] o círculo móvel em uma outra orientação que será, por exemplo, a orientação do próprio meridiano magnético. Então,

[Pág. 193]

ao se passar uma corrente elétrica neste círculo, ele girará de modo a se dispor no plano indicado pelo círculo fixo, passando deste no início – em virtude da velocidade adquirida – voltando posteriormente e cessando de movimentar-se após algumas oscilações.

O sentido que este movimento assume depende do sentido da corrente elétrica estabelecida no círculo móvel. Para prevê-lo de antemão, considera-se uma linha [reta] que passa pelo centro deste círculo e perpendicular ao seu

plano. Esta linha ficará alinhada com o meridiano magnético no momento em que o círculo móvel for levado ao plano perpendicular [ao meridiano]. E ela ficará alinhada de modo que a sua extremidade que estiver à direita da corrente considerada como agindo sobre um ponto tomado à vontade fora deste círculo e, por conseguinte, à esquerda do observador que, colocado no sentido da corrente, olharia a agulha, extremidade que representa o polo austral de uma agulha imantada, se encontra do lado norte. E isto é suficiente para determinar o sentido do movimento que será adotado pelo círculo móvel.[23]

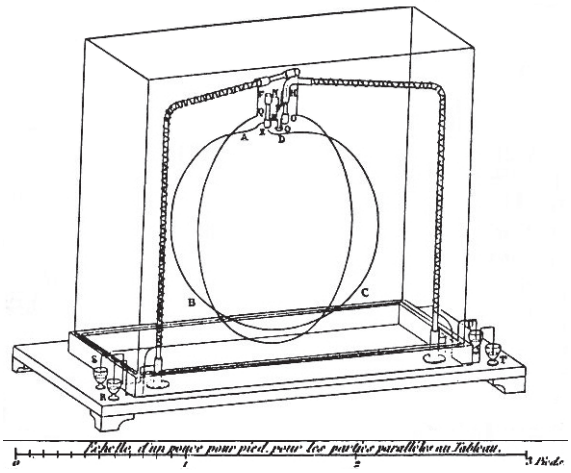


Figura 7

No outro aparelho, o equador da agulha de inclinação é representado por um retângulo em fio de latão com cerca de 3 decímetros de largura sobre 6 de comprimento. A suspensão é de resto a mesma que a da agulha de inclinação. Foi com este dois instrumentos que, em experiências frequentemente repetidas, observei os fenômenos de orientação pela ação da terra, de modo mais completo que o havia feito com a espiral dupla. No primeiro [instrumento], o círculo móvel parou – como acabo de declarar – precisamente na posição onde a ação do globo terrestre devia conduzi-lo de acordo

[Pág. 194]

com a teoria. No segundo [instrumento], o condutor deixou constantemente uma posição onde havia constatado, fazendo-o oscilar, que o equilíbrio era estável, para se colocar em uma situação mais ou menos aproximada daquela que teria tomado, nas mesmas circunstâncias, o equador de uma agulha imantada. E ele parava [nesta nova posição], após algumas oscilações, [entrando] em equilíbrio entre a força diretriz da terra e o peso que agia fazendo curvar o fio de latão, o que levava o centro de gravidade do condutor para baixo do eixo horizontal. Logo que se interrompia o circuito, ele retornava, neste último caso, à sua posição original ou, se não retornava precisamente, mesmo se às vezes ficasse bastante afastado [de sua posição original], era evidente, por todas as circunstâncias da experiência, que isto se devia à curvatura da qual acabo de falar, que havia produzido, na posição do centro de gravidade, uma ligeira alteração que subsistia quando se cessava a corrente elétrica. Nos dois casos, tive cuidado de alterar as extremidades dos fios condutores em relação às [extremidades] da pilha, para constatar que a corrente que existe nesta [ou seja, na pilha] não era a causa do efeito produzido, dado que [o efeito produzido] sempre se apresentava no mesmo sentido, e que este [último] efeito [devido à pilha] apresentava-se em sentido contrário, concordando com a teoria. Também passei da direita para esquerda do instrumento, os fios que faziam comunicar o condutor móvel com as duas extremidades da pilha, deixando as mesmas extremidades em contato. [Isto foi feito] para constatar que as correntes destes fios – onde mantinha sua maior porção distante do instrumento – não tinham influência perceptível sobre seus movimentos. Não tenho necessidade de dizer que, em todos os casos, os mo-

[Pág. 195]

vimentos existiram no sentido para onde se moveria o equador de uma agulha imantada. Isto quer dizer que a extremidade do [eixo] perpendicular ao plano do condutor – que se encontra à direita da corrente e, por conseguinte, à esquerda da pessoa que o olha na situação descrita no primeiro parágrafo desta Memória – é levada ao norte no primeiro caso, e para baixo no segundo caso, como ocorreria com o polo austral de um ímã que é representado por esta extremidade. O instrumento com o qual fiz esta experiência compõe-se de um fio de latão *ABCDEFG* soldado [no ponto] *A* em um pedaço de fio semelhante *HAK* levado pelo tubo de vidro *XY* ao meio do encaixe de cobre *H*, e ao qual

é fixado um pequeno eixo de aço que descansa sobre o rebordo cortado em bisel de uma lâmina de ferro *N* sobre a qual põe-se mercúrio em contato com este eixo. A parte *FG* deste fio de latão passa dentro do tubo de vidro e solda-se ao encaixe de cobre *G*, que tem um pequeno eixo de aço semelhante ao outro, e que descansa sobre o rebordo de uma outra lâmina *M* onde também se põe mercúrio. As duas lâminas de ferro, *M* e *N*, são suportadas pelos apoios *PQ* e *RS*, que entram em contato com o mercúrio das taças de buxo[x] *T* e *U*, onde se faz mergulhar os dois condutores que partem das duas extremidades da pilha. Para impedir a flexão do fio de latão *ABCDEF*, o tubo de vidro *XY* leva, através de um outro encaixe de cobre *I*, um losango de madeira *ZV* muito leve e fino, cujas extremidades apóiam os pontos médios das porções *BC* e *DE* do fio de latão que são paralelas ao tubo de vidro *XY*.

A interposição do mercúrio neste instrumento e naqueles que acabo de descrever, por toda a parte onde deve ocorrer a comunicação por partes que não estão sol-

[Pág. 196]

dadas, sem ser sempre necessário, é o melhor meio que conheço para assegurar o sucesso das experiências. Assim, por duas vezes tinha tentado sem sucesso uma experiência que teve êxito perfeitamente quando, tentando-a uma terceira vez, tornei a comunicação mais completa com uma gota de mercúrio.

III. Sobre a ação mútua entre um condutor elétrico e um ímã.

É esta ação descoberta pelo Sr. Oersted, que me levou a reconhecer a ação de duas correntes elétricas, uma sobre a outra, assim como a ação do globo terrestre sobre uma corrente, e a maneira como a eletricidade produzia todos os
132 fenômenos apresentados pelos ímãs, [como sendo devidos a] uma distribuição semelhante à que ocorre no condutor de uma corrente elétrica, que segue curvas fechadas perpendiculares ao eixo de cada ímã. Estes pontos de vista – cuja maior parte só foi confirmada mais tarde pela experiência – foram comunicadas à Academia real das Ciências, em sua sessão de 18 de setembro de 1820. Vou transcrever o que li nesta sessão, sem outras mudanças além da supressão de passagens que seriam uma repetição do que acabo de dizer e, em especial, daquelas onde descrevia os aparelhos que propunha de serem construídos. Eles foram construídos depois e a maior parte deles foi descrita nos parágrafos precedentes. Desta maneira será possível fazer uma ideia mais justa do caminho que segui nas minhas investigações sobre o assunto do qual nos ocupamos.

As experiências que fiz sobre a ação mútua entre condutores que colocam em contato as extre-

[Pág. 197]

idades de uma pilha voltaica, me mostraram que todos os fatos relativos a esta ação podem ser deduzidos de dois resultados gerais que devem ser considerados de início como dados unicamente pela observação, esperando que se possa deduzi-los de um princípio único, como tentarei fazê-lo dentro em pouco. Começarei por enunciá-los da forma que me parece mais simples e mais geral.

Estes resultados consistem, por um lado, na ação diretriz de um destes corpos sobre o outro; de outro lado, na ação atrativa ou repulsiva que se estabelece entre eles, de acordo com as circunstâncias.

Ação diretriz.

Quando um ímã e um condutor agem um sobre o outro, e que um deles estando fixo, o outro pode apenas girar em um plano perpendicular à distância mais curta entre o condutor e o eixo do ímã, o [corpo] que é móvel tende a se mover [isto é, girar ao redor de seu eixo], de modo que as direções do condutor e do eixo do ímã formem um ângulo reto [entre si], e que o polo do ímã que aponta habitualmente para o norte esteja à esquerda do que se chama geralmente de *corrente galvânica*, denominação que creio que deve ser alterada para a de corrente elétrica,[25] e o polo oposto à sua direita, sendo bem entendido que a linha que indica a menor distância entre o condutor e o eixo do ímã encontra-se com a direção deste eixo entre os dois polos. Para que este enunciado mantenha toda a generalidade a que é susceptível, é necessário distinguir duas espécies de condutores:

1.Em primeiro lugar a própria pilha, dentro da qual a corrente elétrica, no sentido em que emprego esta palavra, vai da extremidade onde se produz o hidrogênio na decomposição da água, até a extremidade onde o oxigênio

[Pág. 198]

se libera.

2.Em segundo lugar o fio metálico que une as duas extremidades da pilha, e onde se deve então considerar a mesma corrente como indo, ao contrário, da extremidade que fornece o oxigênio, à extremidade que desenvolve o hidrogênio.

Podem-se juntar estes dois casos em uma mesma definição, dizendo que se entende por corrente elétrica a direção de acordo com a qual o hidrogênio e as bases dos sais são transportados pela ação de toda a pilha, concebendo a pilha como formando com o condutor [metálico] um só circuito, quando se interrompe este circuito para colocar nele a água ou uma dissolução salina que esta ação decompõe. De resto, tudo o que direi sobre este assunto não supõe de modo algum que haja realmente uma corrente nesta direção, e pode-se somente considerar como uma maneira cômoda e útil de designar o emprego que faço aqui desta denominação de corrente elétrica.

Nas experiências do Sr. Oersted, esta ação diretriz [exercida pela corrente elétrica] combina-se sempre com a que o globo terrestre exerce sobre a agulha imantada, e combina-se, além disso, às vezes com a ação que descreverei no devido momento sob a denominação de *ação atrativa ou repulsiva.* Isto leva a resultados complicados dos quais é difícil analisar as circunstâncias e reconhecer as leis.

Para poder observar os efeitos da *ação diretriz* de uma corrente elétrica sobre um ímã, sem que estes efeitos sejam alterados por estas causas diversas, fiz com que fosse construído um instrumento que denominei de *agulha imantada astática*.[26] Este instrumento, representado na Figura 8, consiste em uma agulha imantada *AB* fixada perpendicularmente

[Pág. 199]

a um eixo *CD*, que se pode colocar na direção que desejar, através de um movimento semelhante ao movimento do apoio de um telescópio e de dois parafusos ajustáveis *E* e *F*. A agulha assim disposta pode se mover somente girando em um plano perpendicular à este eixo. Tem-se o cuidado de que o centro de gravidade [da agulha] seja colocado exatamente neste plano, de modo que antes que ela seja imantada possa-se assegurar que a gravidade não tem nenhuma ação para fazê-la alterar de posição.[27] Então se imanta a agulha. Este instrumento serve então para verificar que, desde que o plano no qual se move [gira] a agulha não esteja perpendicular à direção da agulha de inclinação, o magnetismo terrestre tende a fazer a agulha imantada tomar a direção das linhas traçadas no plano que está o mais próximo possível da direção da agulha de inclinação, ou seja, a projeção desta direção no mesmo plano. Em seguida coloca-se o eixo [*CD*] paralelamente à direção da agulha de inclinação. [Sendo assim] o plano no qual se move [gira]

a agulha imantada é então perpendicular a este eixo e o magnetismo terrestre não tem mais nenhuma ação diretriz sobre a agulha imantada, sendo que a agulha torna-se assim completamente astática. O mesmo aparelho possui, no plano desta agulha, um círculo *LMN* dividido em graus, sobre o qual são fixadas duas pequenas barras de vidro, *GH* e *IK*, para unir os fios condutores, cuja ação diretriz age então sozinha e sem complicação com a gravidade e o magnetismo terrestre.

A principal experiência a realizar com este aparelho é mostrar que o ângulo entre as direções da agulha e do condutor é sempre [um ângulo] reto quando a *ação diretriz* é a única coisa que está atuando.

Ação atrativa ou repulsiva.

Este segundo resultado ge-

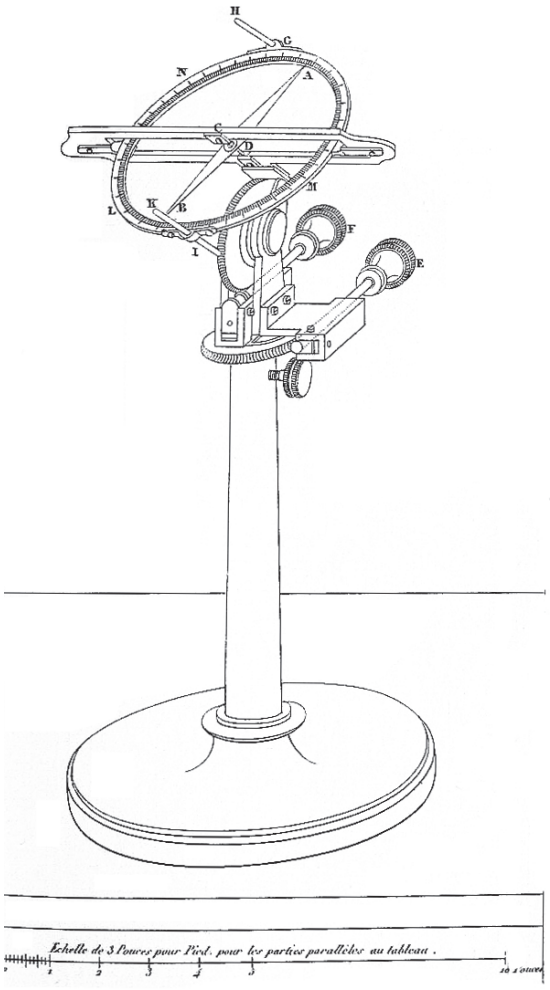


Figura 8

[Pág. 200]

ral consiste, em primeiro lugar, em que um condutor[28] que une as duas extremidades de uma pilha voltaica, e um ímã cujo eixo faz um ângulo reto com a direção da corrente que se estabelece neste condutor em conformidade com as definições precedentes, atraem-se quando o polo austral está à esquerda da corrente que age sobre ele – ou seja, quando a posição é aquela que o condutor e o ímã tendem a tomar em virtude de sua ação mútua[29] – e repelem-se quando o polo austral do ímã está à direita da corrente – ou seja, quando o condutor e o ímã são mantidos na posição oposta àquela que tendem a dar-se mutuamente. Observa-se, pelo próprio enunciado destes dois resultados, que a ação entre o condutor e o ímã é sempre recíproca. Inicialmente tentei verificar [experimentalmente] esta reciprocidade, embora ela me parecesse bastante evidente por si própria.[30] Parece-me que seria supérfluo descrever aqui as experiências que fiz para constatá-la. É suficiente dizer que foram plenamente bem sucedidas.[31]

Os dois modos de ação entre um ímã e um fio conjuntivo que acabo de expor considerando-os como simples resultados da experiência, são suficientes para dar sentido aos fatos observados pelo Sr. Oersted, e para prever o que deve acontecer nos casos análogos face aos quais ainda não se fez observação. Eles indicam de antemão, por exemplo, tudo o que deve acontecer quando uma corrente elétrica age sobre a agulha de inclinação. Não entrarei em nenhum detalhe a esse respeito, dado que tudo que poderia dizer sobre este assunto decorre imediatamente dos enunciados precedentes. Limitar-me-ei a dizer que após ter deduzido apenas o pri-

[Pág. 201]

meiro resultado geral a partir da nota do Sr. Oersted, deduzi a explicação dos fenômenos magnéticos, baseado na existência de correntes elétricas no interior do globo terrestre e no interior dos ímãs. Esta explicação [dos fenômenos magnéticos como sendo devidos a uma suposta existência de correntes elétricas no interior da terra e dos ímãs] conduziu-me ao segundo resultado geral, e sugeriu-me, para constatá-lo, uma experiência que teve êxito por completo. Quando comuniquei-a ao Sr. Arago, este me fez observar com razão, que esta atração entre um ímã e um condutor

elétrico colocados em ângulos retos na direção em que tendem a se colocar mutuamente, e esta repulsão, [quando o eixo do ímã e o condutor retilíneo são ortogonais, mas com a polaridade da agulha] na direção oposta [à direção que ela atingiria naturalmente devido apenas ao torque do condutor], só podiam justificar os resultados publicados pelo autor da descoberta [i. e., por Oersted], no caso em que aproximássemos, da agulha imantada horizontal, um condutor galvânico em uma situação vertical, e que se podia mesmo deduzir facilmente esta lei de uma das experiências do Sr. Oersted, enunciada por ele deste modo: *Posito autem filo (cujus extremitas superior electricitatem à termino negativo apparatûs galvanici accipit) è regione puncto inter polum et medium acûs sito, occidentem versùs agitur*.[32]

Pois este movimento da agulha imantada, indicado como ocorrendo quer o condutor se encontre ao ocidente ou ao oriente da agulha, é no primeiro caso uma atração – porque o polo austral está à esquerda da corrente – e no segundo uma repulsão – porque ele se encontra à direita.

Mas convindo com a coerência desta observação, parece-me que a distinção que fiz dos dois resultados gerais da ação mútua entre um ímã e um fio condutor só se torna mais importante

[Pág. 202]

para explicar o que acontece então ao mostrar que, neste caso, ocorre tanto uma atração quanto uma repulsão, sempre de acordo com a lei do segundo resultado geral que acabo de expor, enquanto que, na experiência que o Sr. Oersted anuncia imediatamente antes nestes termos: *Quando filum conjungens perpendiculare ponitur è regione polo acûs magneticœ, et extremitas superior fili electricitatem à termino negativo apparatûs galvanici accipit, polus orientem versùs movetur,*[33] este movimento somente surge porque a agulha imantada assume, em relação ao condutor, a direção determinada pelo primeiro resultado geral, com todas as circunstâncias que compreendi no seu enunciado e, em especial, com a observação que o termina.[34]

Me resta descrever o instrumento com o qual constatei a existência desta ação entre uma corrente elétrica e um ímã, designada, no que precede, sob o nome de *ação atrativa ou repulsiva*. Observei estes efeitos sem que a *ação diretriz* os alterasse ao se combinar com eles.[35] Este instrumento, representado na Figura 9, é composto de um apoio *ABC* cujos braços *BEG* e *BFH* sustentam o fio conjuntivo horizontal *KL*, junto do qual suspende-se uma pequena agulha cilíndrica imantada *MN*, à extremidade *C* deste apoio, através de um fio de seda *MC*, às vezes pelo seu polo austral e às vezes pelo seu polo boreal.

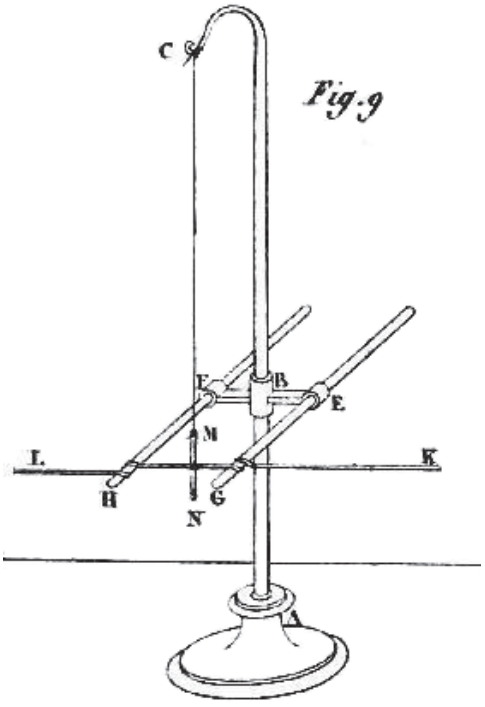


Figura 9

A primeira reflexão que fiz quando desejei procurar as causas dos novos fenômenos descobertos pelo Sr. Oersted, foi que a ordem pela qual se descobrem dois fatos não interfere em quaisquer conclusões a que se possa chegar a partir das analogias que eles apresentam. Podíamos supor

[Pág. 203]

que antes de saber que a agulha imantada assume uma direção constante do sul ao norte – [devido à presença do magnetismo terrestre] – tivéssemos conhecido inicialmente a propriedade de que a agulha é girada por uma corrente elétrica [retilínea] em uma situação [em que o eixo desta agulha fica] perpendicular à esta corrente, de modo que o polo austral da agulha fosse levado à esquerda da corrente,[36] e que se descobrisse posteriormente a propriedade que ela tem de

girar constantemente em direção ao norte [geográfico terrestre, devido ao magnetismo terrestre] a sua extremidade que era levada para o lado esquerdo da corrente. [Se esta fosse a sequência histórica das descobertas,] a ideia mais simples e que se apresentaria imediatamente a quem quisesse explicar a direção constante do sul ao norte, não seria supor [a existência] na terra de uma corrente elétrica, [fluindo] em uma direção tal que o norte [geográfico terrestre] se encontrasse à esquerda de um homem que, deitado sobre a superfície da terra de modo a ter a face voltada para a agulha, recebesse esta corrente indo na direção dos seus pés à sua cabeça, concluindo disto que [esta corrente terrestre] ocorre de leste para oeste, em uma direção perpendicular ao meridiano o magnético?[37]

Esta hipótese torna-se ainda mais provável ao prestar uma atenção maior ao conjunto dos fatos conhecidos. Se existe esta corrente, ela deve ser parecida com a [corrente existente] na pilha que mostrei agir sobre a agulha imantada – dirigindo-se da extremidade de cobre à extremidade de zinco – quando se colocava um condutor entre elas, e que existiria da mesma forma se, com a pilha formando uma curva fechada, elas [as extremidades] estiverem reunidas por um par semelhante às outras, porque não há provavelmente nada no nosso globo [terrestre] que se assemelha a um condutor contínuo e homogêneo. Mas as matérias diversas das quais é composto [o globo terrestre] são precisamente no caso de uma pilha voltaica formadas de elementos dispostos aleatoriamente, e que, voltando sobre si próprios, formariam como que um cinturão contínuo

[Pág. 204]

ao redor de toda a terra. Elementos assim dispostos [aleatoriamente] fornecem, sem dúvida, menos energia elétrica do que se eles estivessem em uma ordem periodicamente regular. Mas seria necessário que fossem arranjados intencionalmente de modo que, em uma série de substâncias diferentes formando uma curva fechada ao redor da terra, não houvesse corrente em um sentido ou no outro. Encontra-se que, de acordo com o arranjo das substâncias da terra, esta corrente ocorre do leste para o oeste, e que ela direciona por toda parte a agulha imantada perpendicularmente à sua própria direção. Esta direção traça assim sobre a terra um paralelo magnético, de modo que o polo da agulha que deve estar à esquerda da corrente se encontra constantemente levada [por esta corrente terrestre] para o norte [geográfico], e a agulha [fica] direcionada de acordo com o meridiano magnético.

Observarei, a este respeito, que os efeitos produzidos pelas pilhas de construção inglesa, onde se queima um fio fino de metal mesmo com apenas um só par em que o zinco e o cobre mergulham em um ácido, provam suficientemente que é uma suposição demasiado restrita admitir a ação eletromotriz somente entre os metais, e de considerar o líquido interposto [entre estes metais] apenas como condutor. Há sem dúvida ação [eletromotriz] entre os dois metais, Volta demonstrou isto de uma maneira bastante completa. Mas há uma razão para que não exista [esta ação eletromotriz] entre os metais e outros corpos, ou somente entre estes [outros corpos]? Provavelmente existe [esta ação eletromotriz] no contato entre todos os corpos que podem conduzir mais ou menos a eletricidade sob uma fraca tensão. Mas esta ação é mais perceptível nas pilhas compostas de metais e de ácidos espalhados, tanto porque parece que estas são as substâncias onde [esta ação eletromotriz] se desenvolve

[Pág. 205]

com mais energia, como pelo fato de que são elas que conduzem melhor a eletricidade.

Os diversos arranjos que podemos dar a corpos não metálicos não conseguiriam produzir uma ação eletromotriz comparável à de uma pilha voltaica feita de discos metálicos separados alternadamente por líquidos, devido ao comprimento pequeno que podemos fornecer aos nossos aparelhos. No entanto, uma pilha que circundasse a terra conservaria sem dúvida alguma intensidade [eletromotriz] mesmo não sendo composta de metais e que seus elementos fossem ordenados aleatoriamente. Pois sobre um comprimento tão grande, seria necessário [para não observarmos nenhuma ação eletromotriz] que o arranjo fosse feito intencionalmente de modo que as ações em um sentido fossem destruídas exatamente pelas ações no outro sentido.

Creio ter o dever de observar a este respeito que as correntes elétricas em um mesmo corpo não podem ser independentes umas das outras, a menos que elas não fossem separadas por substâncias que as isolassem completamente em toda sua extensão e, mesmo neste caso, elas deveriam se influenciar mutuamente, dado que suas ações se transmitem através de todos os corpos. Elas têm um motivo ainda maior [para interagir mutuamente] quando coexistem em um globo no qual todas as partes são contínuas, devendo então direcionar-se todas no mesmo sentido, de acordo com a direção que tende a dar-lhes a união de todas as ações eletromotrizes deste globo. Quanto ao resto, estou longe de crer que seja somente nestas ações que reside a causa das correntes elétricas que são indicadas pela direção que assume a agulha imantada em cada ponto da superfície da terra. Creio, pelo contrário, que a causa principal é muito diferente,

[Pág. 206]

como terei ocasião de dizê-lo em outra ocasião. Quanto ao resto, esta causa, dependente da rotação da terra, daria em cada lugar uma direção constante à agulha, o que é contrário à observação. Por conseguinte, considero a ação eletromotriz das substâncias das quais compõe-se o planeta que habitamos, como se combinando com esta ação geral, e explicando as variações [que se observam na orientação da bússola em relação à direção norte-sul geográfica] na medida que a oxidação se desenvolve em uma ou em outra região continental da terra.

Quanto às variações diurnas, explicam-se facilmente pela mudança alternada de temperatura destas duas regiões durante a duração de uma rotação do globo terrestre, [elas se explicam ainda] mais facilmente por se conhecer há muito tempo a influência da temperatura sobre a ação eletromotriz, influência sobre a qual o Sr. Dessaignes fez observações muito interessantes. Também é necessário levar em conta entre as ações eletromotrizes de diferentes partes da terra, a ação dos minérios imantados que a terra possui e que, como veremos, são considerados como pilhas voltaicas. A elevação de temperatura que ocorre nos condutores de correntes elétricas deve aparecer também nos condutores do globo terrestre. Não seria esta a causa deste calor interno constatado recentemente pelas experiências relatadas, em uma das últimas sessões da Academia, por um dos seus membros, cujos trabalhos sobre o calor fizeram entrar esta parte da física para o domínio das matemáticas? E quando percebemos que esta elevação de temperatura, quando a corrente é bastante enérgica, produz uma incandescência permanente – acompanhada de uma luz bem viva, sem combustão nem

[Pág. 207]

desperdício de substância – não se poderia concluir que os globos opacos só são assim devido à baixa energia das correntes elétricas que existem neles, e encontrar nas correntes mais ativas a causa do calor e da luz dos globos que brilham por eles mesmos?[38]

Sabe-se que anteriormente se explicava por correntes os fenômenos magnéticos, mas estas correntes eram supostas paralelas ao eixo do ímã, situação na qual estas correntes não poderiam existir sem se cruzar e se destruir.[39]

Agora, se as correntes elétricas são a causa da ação diretriz da terra, as correntes elétricas serão também a causa da ação diretriz de um ímã sobre um outro ímã. Segue que um ímã deve ser considerado como um conjunto de correntes elétricas que ocorrem no plano perpendicular ao seu eixo, direcionadas de modo que o polo austral do ímã, que se vira para o norte [geográfico devido à ação magnética da terra], se encontra à direita destas correntes,[40] dado que ele está sempre à esquerda de uma corrente disposta fora do ímã, e que lhe faz face em uma direção paralela. Ou melhor, estas correntes se estabelecem primeiramente no ímã, seguindo as curvas fechadas mais curtas, seja da esquerda para a direita, seja da direita para a esquerda, e então a linha perpendicular aos planos destas correntes torna-se o eixo do ímã, e suas extremidades formam os dois polos. Assim, em cada um dos polos de um ímã, as correntes elétricas em que se compõem são dirigidas ao longo de curvas fechadas concêntricas. Imitei esta disposição tanto quanto era possível com uma corrente elétrica, curvando o fio condutor em espiral. Esta espiral era formada com um fio de latão e terminada por duas porções retilíneas deste mesmo fio, que eram envolvidas dentro de dois tubos de

[Pág. 208]

vidro[41] para que não entrassem em contato entre elas, e pudessem ser unidas às duas extremidades da pilha.

De acordo com o sentido no qual faz-se passar a corrente em tal espiral, ela é fortemente atraída ou repelida pelo polo de um ímã que é colocado [diante da espiral] de modo que a direção do seu eixo seja perpendicular ao plano da espiral, conforme as correntes elétricas da espiral e do polo do ímã estejam no mesmo sentido ou em sentido contrário. Substituindo o ímã por outra espiral, cuja corrente esteja no mesmo sentido que o seu [i. e., no mesmo sentido que as supostas correntes do ímã], tem-se as mesmas atrações e repulsões. [Um esquema deste instrumento com duas espirais encontra-se na Figura 11] Foi assim que descobri que duas correntes elétricas atraíam-se quando fluíam no mesmo sentido, e repeliam-se no caso contrário.

Em seguida, substituindo o fio metálico curvado em espiral por um outro ímã, na experiência da ação mútua entre um dos polos de um ímã e uma corrente em um fio metálico curvado em espiral, têm-se ainda os mesmos efeitos, quer de atração, quer de repulsão, de acordo com a lei dos fenômenos magnéticos conhecidos. É evidente de resto que todas as circunstâncias destes fenômenos são uma sequência necessária da disposição das correntes elétricas de que [os ímãs] são compostos, de acordo com a maneira como estes se atraem e se repelem.

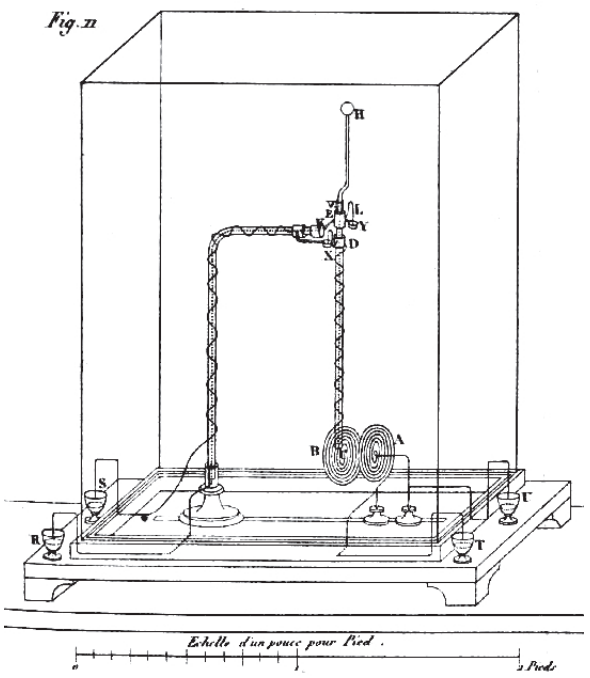


Figura 11

138 Construí um outro aparelho onde o fio condutor é curvado de forma helicoidal ao redor de um tubo de vidro. De acordo com a teoria que fiz relativa a estas espécies de fenômenos, este condutor deve apresentar, quando se faz passar por ele a

[Pág. 209]

corrente elétrica, uma ação semelhante à ação de uma agulha ou de uma barra imantada, em todas as circunstâncias onde estes [corpos] agem sobre outros corpos, ou são direcionados pelo magnetismo terrestre.[42] Já observei uma parte dos efeitos que esperava no emprego de um condutor curvado de forma helicoidal, e não duvido que quanto mais se variar as experiências baseadas na analogia estabelecida pela teoria entre este instrumento e uma barra imantada, mais se obterá provas de que a única causa dos fenômenos magnéticos é a existência de correntes elétricas nos ímãs.

Só pude finalizar a leitura que fiz à Academia disto que acabo de transcrever na seção de 25 de setembro [de 1820]. Terminei esta leitura por um resumo onde deduzi, a partir dos fatos que foram expostos lá, as seguintes conclusões:

1º Duas correntes elétricas se atraem quando fluem paralelamente no mesmo sentido e se repelem quando fluem paralelamente em sentido contrário.

[Pág. 210]

2º Disto resulta, quando os fios metálicos que elas percorrem só podem girar em planos paralelos, que cada uma das duas correntes tende a levar a outra para uma situação onde se encontrem paralelas e direcionadas no mesmo sentido.

3º Estas atrações e repulsões são absolutamente diferentes das atrações e repulsões ordinárias.

4º Todos os fenômenos que apresentam a ação mútua entre uma corrente elétrica e um ímã, descobertos pelo Sr. Oersted, que analisei e reduzi a dois fatos gerais em uma Memória precedente – lida para a Academia em 18 de setembro de 1820 – seguem da lei de atração e repulsão de duas correntes elétricas, tal como ela acaba de ser enunciada, admitindo que um ímã é apenas um conjunto de correntes elétricas que são produzidas por uma ação das partículas do aço umas sobre as outras – de forma análoga à [ação] dos elementos de uma pilha voltaica – e que ocorrem em planos perpendiculares à linha que liga os dois polos do ímã.

5º Quando o ímã está orientado de acordo com a posição que tende a assumir pela ação do globo terrestre, as correntes do ímã estão direcionadas no sentido oposto ao movimento aparente do Sol. De modo que, quando se dispõe o ímã na situação contrária, a fim de que os polos do ímã que apontam para os polos da terra sejam da mesma espécie, as mesmas correntes [do ímã] encontram-se no sentido do movimento aparente do Sol.

6º Os fenômenos conhecidos que se observam quando dois ímãs agem um sobre o outro seguem a mesma lei.

[Pág. 211]

7º E é do mesmo modo que ocorre a ação que o globo terrestre exerce sobre um ímã, admitindo [no ímã] correntes elétricas em planos perpendiculares à direção da agulha de inclinação, e que fluem do leste para o oeste, abaixo desta direção.[43]

8º Não há nada de especial em relação a um dos polos de um ímã quando comparado ao outro polo. A única diferença que existe entre eles é que um polo encontra-se à esquerda e o outro à direita das correntes elétricas que dão ao aço as propriedades magnéticas.

9º Quando Volta provou que as duas eletricidades, positiva e negativa, das duas extremidades da pilha atraíam-se e repeliam-se de acordo com as mesmas leis que [seguem] as duas eletricidades produzidas pelos meios conhecidos antes dele, não demonstrou completamente por este meio a identidade entre os fluidos postos em ação pela pilha e pela fricção. Mas esta identidade foi [de fato] demonstrada – tanto quanto uma verdade física pode ser – quando mostrou que dois corpos, onde um foi eletrizado pelo contato dos metais, e o outro pela fricção, agiam um sobre o outro, em todas as circunstâncias, como se tivessem sido ambos eletrizados com a pilha ou com a máquina elétrica comum. O mesmo tipo de provas encontra-se aqui em relação à identidade das atrações e repulsões entre as correntes elétricas e os ímãs. Acabo de mostrar à Academia a ação mútua de duas correntes. Os fenômenos conhecidos há muito tempo relacionados com a ação mútua entre dois ímãs voltam-se para a mesma lei. Partindo desta semelhança, se provaria apenas que os fluidos elétricos e magnéticos estão sujeitos às mesmas leis – como se admite desde muito tempo – e a única mu-

[Pág. 212]

dança a fazer na teoria comum da imantação seria admitir que as atrações e repulsões magnéticas não devem ser assimiladas às atrações e repulsões que resultam da tensão elétrica, mas às que observei entre duas correntes. As experiências do Sr. Oersted, onde uma corrente elétrica produz ainda os mesmos efeitos sobre um ímã, provam, além disso, que são os mesmos fluidos que agem nos dois casos.

Na sessão de 9 de outubro [de 1820], insisti outra vez nesta identidade entre a eletricidade e a causa dos fenômenos magnéticos, ao mostrar que o ímã somente goza das propriedades que o caracterizam porque existe – nos planos perpendiculares à linha que une os polos do ímã – a mesma disposição de eletricidade que existe no condutor pelo qual se comunicam as duas extremidades de uma pilha voltaica. Designei esta disposição sob o nome de *corrente elétrica* – ao insistir – nas Memórias que li para a Academia, sobre isto que a identidade entre os paralelos magnéticos

e os condutores de uma pilha de Volta, identidade que eu estava em vias de estabelecer, era independente da ideia, qualquer que seja, que se fizer desta disposição elétrica.

Para demonstrar esta identidade por experiências diretas – experiências que repeti na Academia de Ciências na sessão de 9 de outubro [de 1820] – fiz ser construído o aparelho do qual já falei no primeiro parágrafo desta Memória, e que está representado aqui na Figura 1. Está disposto sobre um pedestal *mn* o qual está preso ao quadro que leva a caixa de vidro, destinada a abrigar todo o aparelho das pequenas agitações do ar. Fora desta caixa, dispus quatro taças feitas de buxo, *R, S, T* e *U*,

[Pág. 213]

para colocar nelas mercúrio no qual mergulham os fios de latão que atravessam o quadro sobre o qual ela descansa, e são soldados aos quatro apoios *M, N, P* e *Q*, dos quais os dois primeiros sustentam o condutor fixo *AB*, que podemos afastar ou aproximar do outro [condutor], deslizando estes apoios nas fendas *I* e *J*, onde as fixamos à vontade através de porcas colocadas sob o pedestal, e os dois outros [condutores], *P* e *Q*, terminam nas taças de aço *X* e *Y*, suficientemente grandes para reter as gotas de mercúrio que se dispõem ali, e onde mergulham duas pontas de aço presas aos encaixes de cobre *E* e *F,* nas quais entram as duas extremidades de um tubo de vidro *OZ* que leva no seu centro um outro encaixe de cobre ao qual é soldado um tubo de cobre *V* no qual se encaixa por fricção a haste de um contrapeso *H*. Esta haste é dobrada, como se vê na Figura, a fim de fazer variar a posição do centro de gravidade de toda a parte móvel do aparelho, ao girar a haste dobrada sobre ela mesma no tubo de cobre. Pode-se aproximar ou afastar estes apoios um do outro deslizando-os na fenda *KL*, onde são fixados na distância que se queira, através de porcas colocadas sob o pedestal. Nos dois encaixes de cobre, *E* e *F*, são soldadas as duas extremidades do fio de latão *ECDF* – onde o trecho *CD*, paralelo ao trecho *AB* – é o que chamei de *condutor móvel*.

Quando se quer usar este aparelho – após ter fixado os dois apoios, *P* e *Q*, a uma distância tal que os centros das taças *X* e *Y*, que correspondem às pontas de aço sustentadas pelos encaixes *E* e *F*, e os apoios *M* e *N*, a uma distância dos dois primeiros que se julga mais conveniente – colocamos estas pontas de aço nas

[Pág. 214]

taças, e gira-se a haste do contrapeso *H*, no cilindro *V,* até que o condutor móvel fique na posição que queremos lhe dar, [com] os trechos *CE* e *FD* – que fazem parte [do condutor móvel] – ficando aproximadamente verticais. Agora, caso se deseje destacar a atração entre duas correntes quando estas fluem no mesmo sentido, estabelece-se, por um fio de latão que passa por baixo do instrumento, e cujas extremidades se curvam para mergulhar em duas das taças de buxo, tais como *R* e *U*, ou *S* e *T*, o contato entre as extremidades opostas dos dois condutores *AB* e *CD*, e ligamos as duas taças restantes com as extremidades da pilha, por meio de outros dois fios de latão. Se for a repulsão que se propõe a observar, é necessário que o primeiro fio de latão estabeleça o contato entre as duas taças, tais como *R* e *S*, ou *T* e *U*, correspondentes às extremidades dos dois condutores situados do mesmo lado, enquanto que as extremidades da pilha entram em contato com as duas taças dispostas do lado oposto.

Estas taças fornecem, quando se quer, os meios para estabelecer a corrente elétrica em um só condutor, mergulhando os dois fios partindo das extremidades da pilha no mercúrio das duas taças que estão em contato com este condutor. Esta disposição de quatro taças de buxo arranjados desta maneira – que se encontra nos vários aparelhos já descritos ou que me faltam descrever – explico-a aqui de uma vez por todas, e me contentarei de as representar nas figuras destes instrumentos, sem descrevê-las no texto, para evitar repetições inúteis.

[Pág. 215]

Para pôr na ordem do dia a analogia das correntes nos fios condutores e as [correntes] que admito existir nos ímãs, obtive duas pequenas agulhas fortemente imantadas, presas no centro de uma presa dupla de latão, possuindo uma flecha que indica a direção da corrente do ímã. Representei uma destas agulhas de lado e a outra de frente, ao lado da Figura 1. A agulha é representada por *ab*, a presa dupla por *cd*, e a flecha por *ef*. Através da presa dupla, estas agulhas são adaptadas sobre os condutores *AB* e *CD*, quando se quer colocá-las aí, em uma situação na qual a linha que une os seus polos é vertical, e na qual suas correntes, sempre paralelas aos condutores, são direcionados à vontade no mesmo sentido ou em sentido oposto. Eis o uso destas agulhas: após ter produzido as atrações e as repulsões entre os condutores *AB* e *CD*, ao fazer fluir em ambos a corrente elétrica, faz-se a corrente passar apenas em um dos dois condutores, e sobre o outro se coloca uma das agulhas imantadas na situação que acabo de indicar, de modo que a corrente que admito [que exista] na agulha esteja de início [fluindo] no mesmo sentido em que fluía anteriormente no condutor em que a agulha está adaptada. Vê-se então que o fenômeno de atração ou de repulsão, que era exibido inicialmente pelos dois condutores, continua existindo em virtude disso que chamei de *ação atrativa ou repulsiva* no início deste parágrafo. Em seguida dispõe-se a mesma agulha de modo que a sua corrente esteja direcionada em sentido contrário, e se obtém o fenômeno oposto, em virtude da mesma ação, precisamente como se tivéssemos alterado a direção da corrente que esta agulha substituiu, ao

[Pág. 216]

conectar – em uma ordem oposta daquela que se tinha estabelecido inicialmente – as duas extremidades da pilha com as extremidades do condutor desta corrente.

Enfim, não fazendo mais passar corrente elétrica em nenhum dos dois condutores, e colocando sobre cada um destes condutores uma agulha imantada sempre na mesma situação vertical na qual seu eixo faz um ângulo reto com o condutor que a sustenta, de modo que suas correntes ainda estejam paralelas a este condutor, tem-se outra vez, de acordo com a ação conhecida de dois ímãs um sobre o outro, as mesmas atrações e repulsões que existiam quando as correntes fluíam nos dois condutores, no caso em que as correntes das agulhas são ambas os no mesmo sentido, ou ambas em sentido contrário, em relação às correntes elétricas que elas substituem, e [ocorrem] fenômenos opostos quando uma [corrente] está no mesmo sentido e a outra no sentido oposto. Tudo concorda com a teoria fundamentada na identidade entre as correntes [elétricas internas] do ímã e as [correntes] que se produz com a pilha de Volta.

Pode-se também verificar esta identidade no instrumento representado na Figura 2. Ao substituir o condutor fixo *AB* por uma barra imantada situada horizontalmente em um direção perpendicular à deste condutor, e de modo que as correntes deste ímã estejam no mesmo sentido que a corrente elétrica estabelecida de início no condutor fixo, então se passa corrente somente no condutor móvel, e observa-se que este [condutor móvel] gira pela ação do ímã precisamente como o fazia na experiência em que a corrente fluía nos dois condutores, e onde não havia a barra imantada. Foi para prender esta barra que

[Pág. 217]

fiz com que fosse ligado a este aparelho o suporte *XY* – terminando em *Y* pelo encaixe *Z* aberto nas duas extremidades – onde se fixa o ímã na posição que acabo de explicar através do parafuso de pressão *V*.

Quanto ao aparelho representado pela Figura 9, vê-se por esta Figura que os meios de comunicação com as extremidades da pilha, e o modo de suspensão do condutor móvel, são aproximadamente os mesmos que aqueles representados na Figura 1. Estes dois instrumentos apenas diferem em que, no instrumento da Figura 9, os dois condutores *A* e *B* são curvados em espiral, e o condutor móvel *B* é suspenso por um tubo de vidro vertical *CD*. Este tubo é terminado em sua parte inferior no centro da espiral que forma este condutor, e leva no seu interior o prolongamento

do fio de latão desta espiral. Este prolongamento chega em *D* – na parte superior do tubo – sendo aí soldado ao encaixe de cobre *E*, que sustenta o tubo de cobre *V*, no qual se encontra o contrapeso *H* – encaixado por fricção – e uma ponta de aço *L* que mergulha na gota de mercúrio da taça *Y*, enquanto que a outra extremidade do mesmo fio de latão, após envolver o tubo *CD* em forma de hélice, solda-se ao encaixe de cobre *D*, ao qual se une a outra ponta de aço *K* destinada a ser mergulhada também em uma gota de mercúrio colocado na taça *X*. Estas duas taças são de aço, a fim de não serem danificadas pelo mercúrio. As pontas se apóiam sobre as suas superfícies côncavas como no instrumento representado na Figura 1.

Aqui seria o lugar de falar de um outro tipo de ação das correntes elétricas sobre o aço, a ação pela qual elas lhe transmitem as propriedades magnéticas, e de

[Pág. 218]

mostrar que todas as circunstâncias desta ação, cujo conhecimento devemos ao Sr. Arago, são outras provas da teoria exposta nesta Memória a respeito da natureza elétrica do ímã. Me parece que podemos dizer que estas provas completam a demonstração desta teoria. Teria também, para não omitir nada do que se conhece sobre a ação mútua entre os fios condutores e os ímãs, de falar das experiências muito interessantes comunicadas à Academia em uma Memória em que um físico repleto de sagacidade, o Sr. Boisgiraud, leu na sessão do dia 9 de outubro de 1820. Uma destas experiências não deixa nenhuma dúvida sobre um ponto importante da teoria da ação mútua entre um fio condutor e um ímã, ao provar que esta ação ocorre entre o fio condutor e todas as seções transversais perpendiculares à linha que liga os dois polos do pequeno ímã sobre o qual ele age, sem se desenvolver com uma energia maior sobre os polos deste ímã, como se observa na ação que os diversos pontos do comprimento de uma barra imantada exercem sobre uma pequena agulha. Mas as descobertas do Sr. Arago foram expostas por ele mesmo neste periódico, e espero que o Sr. Boisgiraud publique o mais cedo possível as suas experiências, e que terei ocasião, em uma segunda Memória[ar] onde me ocuparei da teoria matemática dos fenômenos apresentados pelas correntes elétricas, de deduzir, como prova da exatidão desta teoria, as consequências que decorrem naturalmente dos fatos que ele observou.

Notas e referências bibliográficas

João Paulo M. de C. Chaib *é doutorando em física no Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, E-mail: jopachaib@yahoo.com.br.* *Ele agradece à PRPG/Unicamp pelo apoio financeiro concedido através de uma bolsa de doutorado.*
André K. T. Assis*, doutor em física, é professor do Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, E-mail: assis@ifi.unicamp.br; homepage: http://www.ifi.unicamp.br/~assis.* *Os autores agradecem a F. M. d. M. Ravanelli pelos comentários.*

1 AMPÈRE, A.-M., Suite du Mémoire sur l'Action mutuelle entre deux courans électriques, entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et entre deux aimans. *Annales de Chimie et de Physique*, v. 15, p. 170-218, 1820. Disponível em: <http://www.ampere.cnrs.fr/> Acesso em 22/11/2007.

2 HOFMANN, J. R., *André-Marie Ampère* – Enlightenment and Electrodynamics, Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p. 238.

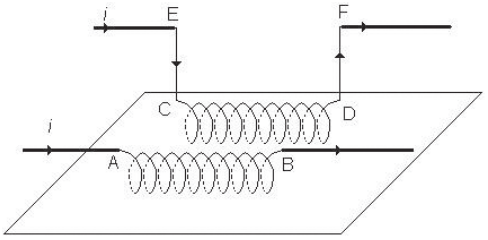
3 AMPÈRE, A.-M., Dissertation of M. Ampère. Traduzido do francês para o inglês por O. M. Blunn. In: TRICKER, R. A. R., *Early Electrodynamics* – The First Law of Circulation. Oxford: Pergamon Press, 1965, p. 146-154. Esta é uma tradução parcial do trabalho de AMPÈRE, A.-M., publicado em *Annales de Chimie et de Physique*, v. 15, p. 170-218, 1820.

4 [N. T.] Na primeira parte deste trabalho.

5 [N. T.] As letras *G* e *H* não aparecem na Figura original de Ampère. A Figura com estas letras como aparece aqui foi retirada de POUDENSAN, L., *Ampère* – Extraits du mémoire de l'action exercée sur un courant électrique par un autre courant, le globe terrestre ou un aimant. Paris: Gauthier-Villars, 1964. p. 36.

6 [N. A. 1] Mais tarde mudei este modo de suspensão, assim como o descreverei [mais adiante].

7 [N. T.] Ampère não apresenta nenhuma Figura para ilustrar este aparelho. Apresentamos aqui uma Figura para ajudar na compreensão do problema. As hélices *AB* e *CD* estão enroladas no mesmo sentido. Elas estão paralelas e horizontais. A hélice *AB* está fixa no laboratório, enquanto que o trecho *ECDF* pode girar ao redor de um eixo horizontal passando por *EF*, fazendo com que a hélice *CD* se aproxime ou se afaste da hélice *AB*.

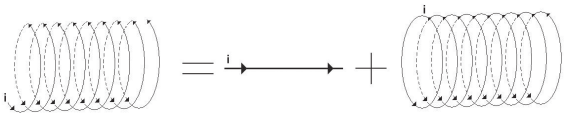


8 [N. T.] Este novo princípio que Ampère vai introduzir, ao qual se referia como uma lei, foi chamado por Hofmann de lei da adição de Ampère, HOFMANN, J. R., *André-Marie Ampère* – Enlightenment and Electrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p. 246-250. Vamos descrevê-lo em notação vetorial moderna. Sejam dois elementos de corrente infinitesimais de intensidades I_1 e I_2, comprimentos $d\mathbf{l}_1 = |d\mathbf{l}_1|$ e $d\mathbf{l}_2 = |d\mathbf{l}_2|$, fluindo ao longo de $d\mathbf{l}_1$ e $d\mathbf{l}_2$, respectivamente. O princípio que Ampère vai assumir é o de que a força exercida por $I_1 d\mathbf{l}_1$ sobre $I_2 d\mathbf{l}_2$ é a mesma força que seria exercida sobre $I_2 d\mathbf{l}_2$ pela soma das decomposições vetoriais de $I_1 d\mathbf{l}_1$ atuando sobre $I_2 d\mathbf{l}_2$, com cada componente considerada como exercendo uma força sobre $I_2 d\mathbf{l}_2$ que é independente da força exercida pelas outras componentes. Por exemplo, a força resultante seria dada pela soma das forças sobre $I_2 d\mathbf{l}_2$ exercidas por $I_1 d\mathbf{l}_{1x}\hat{i}$, por $I_1 d\mathbf{l}_{1y}\hat{j}$ e por $I_1 d\mathbf{l}_{1z}\hat{k}$, onde $d\mathbf{l} = d\mathbf{l}_{1x}\hat{i} + d\mathbf{l}_{1y}\hat{j} + d\mathbf{l}_{1z}\hat{k}$, em componentes cartesianas. Isto é, a força exercida sobre um outro circuito ou sobre um ímã por um elemento de corrente infinitesimal é equivalente à soma das forças que se imagina serem produzidas pelas componentes nas quais foi decomposta o elemento de corrente original.

8 [N. T.] Neste estágio inicial de suas pesquisas Ampère ainda apresenta suas ideias de forma um pouco confusa. Em particular, ele não deixa clara a distinção entre o comprimento de um elemento de corrente e a intensidade da corrente elétrica que flui por ele. Mas no final de 1820 Gillet de Laumont apresentou um resumo das pesquisas de Ampère. Utilizando versões revisadas pelo próprio Ampère, Laumont substituiu em um texto destinado aos *Annales de Mines* de 6 de novembro de 1820 a expressão "porções infinitamente pequenas de correntes elétricas, cujas intensidades sejam proporcionais aos seus comprimentos" por outra expressão bem mais clara, a saber: "correntes elétricas cujas forças atrativas e repulsivas são proporcionais a seus comprimentos," ver LAUMONT, G. d., Note sur les expériences électromagnétiques de MM. Oersted, Ampère et Arago, relatives à l'identité de l'aimant avec l'électricité. *Annales de Mines*, v. 5, p. 535-546, 1820; HOFMANN, J. R., *André-Marie Ampère* – Enlightenment and Electrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p. 253.

9 [N. T.] Isto é, pelo passo da hélice. Ou seja, se consideramos uma volta completa de 360º de uma espira da hélice e a projetamos sobre o eixo da hélice, o passo é a distância ao longo do eixo entre o início e o fim de uma única espira. Ampère aqui está considerando uma hélice filiforme idealizada, sem espessura.

10 [N. T.] Isto é, quando Ampère enrolou uma hélice ao redor de um eixo de vidro, sem retornar com um fio retilíneo em seu interior, esta hélice apresentou o mesmo comportamento que se fluísse uma corrente retilínea de mesma intensidade ao longo do eixo da hélice, com o comprimento deste fio retilíneo sendo igual ao comprimento da hélice (ou seja, igual ao comprimento do cilindro de vidro sobre o qual estava enrolada a hélice). Ampère concluiu que a ação desta hélice sobre uma outra corrente pode ser representada como a ação sobre esta outra corrente devida a um fio retilíneo com o comprimento igual ao da hélice, mais a ação sobre esta outra corrente devida a uma corrente puramente azimutal sobre um cilindro com raio igual ao raio da hélice, como em um solenóide. Ilustramos isto com a Figura a seguir.



11 [N. T.] Comparado com o comprimento da hélice. Isto é, se a hélice foi enrolada sobre um cilindro de vidro, o raio deste cilindro era muito menor do que seu comprimento.

12 [N. T.] Isto é, quando a distância longitudinal entre duas espiras consecutivas é muito menor do que o raio das espiras.

13 [N. T.] Isto é, os efeitos serão devidos às ações produzidas pelos anéis circulares *E, F, G*, etc.

14 [N. T.] Isto é, com a espessura ou comprimento de cada seção transversal sendo muito menor do que seu raio externo.

15 [N. T.] Ao longo do comprimento das duas seções transversais, para se obter a interação entre dois ímãs cilíndricos.

16 [N. A. 2] Estes cálculos supõem que a presença de uma corrente elétrica ou de um outro ímã não altere em nada as correntes elétricas do ímã sobre o qual agem. Isso não acontece jamais para o ferro doce. Mas como o aço temperado conserva as modificações a que é submetido por esse meio - seja nas experiências do Sr. Arago sobre a imantação do aço por uma corrente elétrica, seja no emprego dos procedimentos da imantação comum – me parece que quando o aço imantado encontra-se precisamente no mesmo estado que antes, depois que um outro ímã ou uma corrente elétrica tenha agido sobre ele, pode-se concluir que [as experiências] não terão, durante sua ação, mudado sensivelmente a direção e a intensidade das correntes que o compõem, sem o que as modificações a que se teria submetido [o aço] permaneceriam depois que esta ação tivesse parado.

17 [N. T.] Com este instrumento Ampère realizou medidas qualitativas a respeito da força entre duas correntes retilíneas contidas em planos paralelos mas cujas direções estavam inclinadas entre si. Descreveu da seguinte maneira seus resultados: "Quando em vez de estarem dirigidas ao longo de linhas paralelas, seja no mesmo sentido, seja em sentidos opostos, as duas correntes estão dirigidas ao longo de duas linhas que não se encontram mas cujas direções formam um ângulo, existe atração quando ao considerar estas linhas no sentido das correntes que as percorrem, o ângulo que elas formam é agudo; mas esta atração é sempre menor do que a atração que ocorre no caso em que as correntes são paralelas e dirigidas no mesmo sentido, e esta atração vai sempre diminuindo na medida em que este ângulo aumenta até que ela se anula quando as duas correntes estão em direções retangulares [isto é, perpendiculares entre si]. Quando o mesmo ângulo é obtuso, a atração se transforma em repulsão; esta repulsão [...] (atinge) seu máximo quando este ângulo torna-se igual a dois [ângulos] retos, isto é, quando as duas correntes estão dirigidas em sentidos contrários ao longo de duas linhas paralelas." AMPÈRE, A.-M., Archives de l'Académie des Sciences de Paris, carton 8, chemise 158. Ver também BLONDEL, C. Sur les premières recherches de formule électrodynamique par Ampère (octobre 1820). *Revue d'Histoire des Sciences*, v. 31, p. 53-65, 1978.

18 [N. T.] Não se encontram nas publicações de Ampère e em nenhum de seus manuscritos medidas numéricas precisas realizadas com este instrumento. Provavelmente estas medidas nunca foram realizadas. Blondel caracteriza a primeira fase das pesquisas de Ampère com as seguintes palavras, BLONDEL, C., *A.-M. Ampère et la Création de l'Électrodynamique*. Paris: Bibliothèque Nationale, 1982, p. 101: "[Ampère demonstrou] uma grande engenhosidade para conceber dispositivos novos mas, pelo contrário, uma ausência quase total de medidas. Nenhum resultado numérico, nenhum algarismo nos rascunhos de Ampère. A única experiência na qual parece ter utilizado um instrumento de medida, o cronômetro, foi a repetição da experiência de Biot inclinando o ímã."

19 [N. T.] Denominamos esta espira de "espira astática," isto é, uma espira que é indiferente ao magnetismo terrestre. Ela vai permanecer parada em qualquer posição da qual seja solta em repouso, sem girar para lado algum embora tenha liberdade para isto. Ela não é orientada pela ação magnética da terra. Em 1821 Ampère enfatizará a importância deste aparelho e detalhará sua montagem e seu papel fundamental, construindo esta espira com formas distintas, AMPÈRE, A.-M. Note sur un appareil à l'aide duquel on peut vérifier toutes les propriétés des conducteurs de l'électricité voltaïques, découvertes para M. Ampère. *Annales de Chimie et de Physique*, v. 18, p. 88-106, 1821, ver especialmente as páginas 91 e 92: "Mas sabe-se que juntando duas agulhas ou duas barras imantadas de mesmo comprimento e de mesma força [isto é, de mesma intensidade magnética], de maneira que os polos de nomes diferentes estejam reunidos, as ações magnéticas destas barras [sobre uma terceira barra imantada] se neutralizam. De onde o Sr. Ampère concluiu por analogia, que um condutor móvel, formado por duas circunferências iguais e [contidas no mesmo plano, com suas correntes fluindo em direções] opostas *bcdef* e *b'c'd'e'f'* [isto é, uma corrente fluindo no sentido horário e outra corrente de mesma intensidade fluindo em um círculo de mesmo raio que o círculo anterior, mas agora

no sentido anti-horário], não sofreria qualquer ação [eletromagnética] por parte do globo [terrestre]."

20 [N. A. 3] O que está contido neste parágrafo foi lido na Academia real das Ciências, na sua sessão do último dia 30 de outubro [de 1820].

21 [N. T.] Provavelmente Ampère quis dizer aqui um ângulo de 100 grados – um quarto de uma circunferência total – ou 90 graus. Isto é, mesmo quando o fio reto estava no plano do meridiano magnético, a agulha da bússola na experiência de Oersted nunca se desviava até ficar ortogonal ao fio. Ampère vai concluir que isto se deve ao torque conjunto do fio e da terra ao atuarem sobre a agulha da bússola.

22 [N. T.] Neste parágrafo Ampère se refere ao artifício que ficou conhecido como observador de Ampère. Ele foi introduzido na página 67 da versão original da primeira parte deste trabalho. Vamos imaginar uma espira circular móvel, que pode girar ao redor de um eixo fixo em relação à terra, que pertence ao plano da espira e passa por seu centro. A linha reta que Ampère imagina perpendicular ao plano da espira e passando por seu centro será análoga a uma agulha imantada de bússola. Ele quer saber qual das extremidades desta linha se comportará como um polo austral (ou seja, como um polo norte magnético que tende a apontar para o polo norte geográfico terrestre). Para isto ele imagina o observador colocado tangencialmente à espira móvel, com a corrente elétrica entrando por seus pés e saindo por sua cabeça. O observador está com seus olhos voltados para o centro da espira, olhando em direção a seu eixo perpendicular (a linha reta que ele vai imaginar como sendo a agulha de uma bússola). Nesta situação a extremidade da linha reta que está à sua esquerda se comportará como sendo o polo austral da agulha. Sabendo isto e o fato de que o polo austral de uma agulha imantada tende a apontar para o norte geográfico terrestre, Ampère encontra uma regra para dizer em que direção vai girar a espira móvel quando for dada a direção da corrente que flui por ela.

23 [N. T.] Buxo: gênero de plantas sempre verdes que serve de tipo às buxáceas; a espécie anã é empregada para guarnecer jardins e a arbórea dá uma madeira muito densa e dura, utilizada para pequenas peças. Fonte: Dicionário on-line Priberam, disponível em: <http://www.priberam.pt/dlpo/dlpo.aspx>. Acesso em 22 nov. 2007.

24 [N. T.] Como discutimos na tradução da primeira parte deste trabalho, Ampère está utilizando aqui uma nova nomenclatura, corrente elétrica em vez de corrente galvânica. Esta sugestão de Ampère passou a ser adotada pela maioria dos pesquisadores.

25 [N. T.] O significado da palavra "astática," como utilizada por Ampère, é a de equilíbrio indiferente. No caso da Figura 8 a agulha imantada *AB* tem liberdade para girar em um plano perpendicular ao eixo *CD*. Este eixo é colocado paralelo a uma agulha de inclinação. Nesta situação a agulha *AB* permanecerá parada em qualquer posição em que for solta do repouso. Ou seja, não será orientada pelo magnetismo terrestre, estando em uma situação de equilíbrio indiferente em relação à ação magnética da terra.

26 [N. T.] Qualquer que seja a orientação inicial da agulha em relação à terra.

27 [N. T.] O condutor aqui é fechado através da bateria, com a corrente fluindo em um plano. Podemos pensar em uma corrente descrevendo uma trajetória retangular. O eixo do ímã ou da agulha imantada que vai interagir com este condutor é perpendicular ao plano do retângulo, com o centro do ímã estando no mesmo plano que o retângulo com corrente. A parte do condutor que Ampère está considerando aqui é o lado retilíneo do retângulo que está mais próximo do centro do ímã. Para simplificar podemos imaginar esta parte retilínea como sendo infinita, isto é, com um comprimento muito maior do que o comprimento do ímã e também muito maior do que a distância entre o centro do ímã e este condutor retilíneo.

28 [N. T.] Vamos supor um condutor retilíneo ao longo do eixo *y*, com a corrente fluindo ao longo da direção positiva deste eixo. Colocamos uma agulha imantada de comprimento *L* paralela ao eixo *z*, com seu centro localizado ao longo do eixo *x*, em $x > 0$. Vamos desprezar a ação do magnetismo terrestre, ou supor que a agulha está em uma posição astática tal que não seja influenciada pelo magnetismo terrestre. Se a agulha puder girar ao redor de seu centro de gravidade vem que ela vai ficar orientada ao longo do eixo *z* na posição de equilíbrio. Vamos imaginar o observador de Ampère ao longo do eixo *y*, com a corrente entrando por seus pés a saindo por sua cabeça, olhando para a agulha cujo centro está em $x > 0$. Se nesta situação a agulha tiver liberdade de movimento ao longo do eixo *x*, vem que ela será atraída pelo circuito caso o polo norte da agulha esteja à esquerda do observador de Ampère e seu polo sul à direita do observador de Ampère. Esta orientação da agulha imantada – paralela ao eixo *z*, com seu polo norte na região $z < 0$ e com seu polo sul na região $z > 0$ – é a posição que ela tende a tomar devido a sua interação com a corrente no condutor. Caso o polo norte da agulha esteja à direita do observador e seu polo sul esteja à esquerda do observador, vem que a agulha será repelida pelo condutor.

29 [N. T.] Esta preocupação em evidenciar a reciprocidade do fenômeno se deve a sua concepção de que a ação eletrodinâmica obedece à terceira lei de Newton. Ampère defende, em particular, que a força e o torque exercidos por um corpo *A* sobre um corpo *B* devem ser iguais e opostas à força e ao torque exercidos por *B* sobre *A*. O "corpo" aqui pode ser um ímã ou um circuito com corrente constante.

30 [N. T.] A reciprocidade no caso do torque também foi obtida experimentalmente por Oersted. Em seu primeiro artigo de 1820 observou um condutor com corrente girando uma agulha imantada, ver: ØRSTED, H. C., Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, v. 10, p. 115-122 (1986). Tradução de R. de A. Martins. Em um outro artigo também de 1820 observou um forte ímã girando um condutor ligado a uma bateria no qual fluía uma corrente constante, ver: ØRSTED, H. C., New electro-magnetic experiments, in: FRANKSEN, O. I. *H. C. Ørsted* – A Man of the Two Cultures. Berkerød: Strandbergs Forlag, 1981. p. 421-424. Neste artigo Oersted suspende um elemento galvânico ligado a um fio no qual circula uma corrente constante. O conjunto pode girar ao redor de um eixo vertical. Perto deste conjunto ele fixa no laboratório um ímã potente. Então afirma: "Como um corpo não pode ser colocado em movimento sem que ele próprio seja movido, desde que ele seja móvel, é fácil prever que o elemento galvânico tem de adquirir algum movimento devido ao ímã." Realiza a experiência e conclui: "Se, em vez de uma agulha [imantada] móvel [como na primeira experiência de Oersted], um dos polos de um ímã potente for apresentado a uma das extremidades *ff* [de um fio de latão ligado ao elemento galvânico, no qual flui uma corrente constante], o aparelho galvânico será colocado em movimento e vai girar ao redor do eixo [vertical] estendido *ab* de acordo com a natureza do polo." Isto é, se o polo norte do ímã for aproximado a uma região do circuito, o circuito vai girar em um sentido. Caso seja aproximado o polo sul do ímã à mesma região do circuito, o circuito vai girar no sentido contrário.

31 [N. T.] Utilizando a tradução de R. de A. Martins do trabalho de Oersted, este trecho ficaria assim: "Quando o fio de conexão (cuja extremidade superior recebe eletricidade do terminal negativo do aparelho galvânico) é colocado verticalmente na região entre o polo e o meio da agulha , ela se move para oeste," ver pág. 120 de ØRSTED, H. C., Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, v. 10, p. 115-122 (1986). Tradução de R. de A. Martins.

32 [N. T.] "Quando o fio de conexão é colocado verticalmente na região defronte ao polo da agulha magnética, e a extremidade superior do fio recebe eletricidade do terminal negativo do aparelho galvânico, o polo se move para leste," ver pág. 120 de ØRSTED, H. C., Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, v. 10, p. 115-122 (1986). Tradução de R. de A. Martins.

33 [N. T.] Ampère confronta sua descrição do fenômeno de interação entre a agulha magnética e o fio condutor com a interpretação de Oersted. Ampère esclarece que seus resultados não foram alcançados por Oersted possivelmente devido à presença, nas experiências de Oersted, da ação magnética e gravitacional da terra sobre a agulha. Oersted explica todos os efeitos observados como sendo devidos somente à ação diretriz do fio sobre a agulha imantada. Já Ampère chama a atenção para a ação direcional do magnetismo terrestre atuando sobre a agulha. Elimina este efeito e mostra que a ação do fio com corrente atuando sobre a agulha pode ser separada em dois aspectos. Um primeiro aspecto é a tendência do condutor exercer um torque sobre a agulha. O segundo aspecto é a existência de uma força resultante exercida pelo fio sobre a agulha.

34 [N. T.] Ou seja, para observar apenas a ação atrativa ou repulsiva exercida pelo fio sobre a agulha imantada, Ampère inicialmente colocou a agulha orientada de tal forma que ela não sofresse nenhum torque exercido pelo condutor.

35 [N. T.] Em relação ao observador de Ampère, que é tangente à corrente, com ela entrando pelos seus pés e saindo por sua cabeça, sendo que ele está olhando para a agulha imantada. Nesta situação o polo norte da agulha tende a se deslocar para a esquerda deste homem.

36 [N. T.] Neste parágrafo é importante notar a linha de raciocínio que Ampère realizou ao tomar conhecimento da experiência de Oersted. Isto levou-o a uma posterior comprovação experimental de suas ideias.

37 [N. T.] Devemos lembrar que naquela época era desconhecida a causa do brilho das estrelas. Ampère apresenta uma solução plausível para o problema.

38 [N. T.] Ampère está se referindo aqui à teoria magnética de Descartes (1596-1650). Ele tentou explicar os fenômenos magnéticos através de sua teoria de vórtices. Ele postulou um vórtice de matéria fluida ao redor de cada ímã, com a matéria do vórtice entrando em um polo e saindo pelo outro. Ver WHITTAKER, E., *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Vol. 1, *The Classical Theories*. New York: Humanities Press, 1973. p. 34.

39 [N. T.] Em relação ao observador de Ampère. Vamos supor um ímã cilíndrico com este homem colocado tangencialmente no equador do cilindro, com a suposta corrente elétrica que existiria no ímã entrando por seus pés e saindo por sua cabeça. Este homem estaria olhando para fora do cilindro, com suas costas voltadas para o eixo do cilindro. Para este homem o polo norte deste ímã estaria à sua direita. Ver TRICKER, R. A. R., *Early Electrodynamics* – The First Law of Circulation. Oxford: Pergamon Press, 1965. p. 28.

40 [N. A. 4] Depois mudei esta disposição, como direi adiante.

41 [N. A. 5] Quando escrevi isso, não conhecia bem a ação exercida pelas espiras da hélice paralelamente ao seu eixo, e acreditava que poderia negligenciá-la, o que não é verdade. Mas tudo o que direi aqui será verdadeiro caso se entenda [o que está sendo dito] como [aplicado a] uma hélice na qual se destruiu esta ação [paralela ao seu eixo] por uma corrente retilínea oposta, estabelecida no interior do tubo de vidro que está envolvido pelas espiras, de modo que sobre apenas a ação que cada espira exerce em um plano perpendicular ao eixo da hélice, assim como foi explicado no primeiro parágrafo desta Memória.

42 [N. T.] Ou seja, vamos assumir um ímã cilíndrico que já se alinhou ao longo da direção norte-sul geográfica terrestre. De acordo com Ampère, a corrente que flui na direção azimutal deste ímã vai de leste para oeste na parte do ímã mais próxima da terra, indo então na direção contrária na parte superior do ímã, ou seja, de oeste para leste.

43 [N. A. 6] Como aquilo que tenho a dizer sobre a ação mútua entre dois ímãs se compõe bem menos de fatos novos do que de cálculos pelos quais vinculamos esta ação à ação entre duas correntes elétricas, achei melhor deixar para esta segunda Memória, o parágrafo no qual me proponho a examinar a lei de acordo com a qual esta ação se exerce, e de mostrar que esta lei é uma consequência necessária da causa que lhe atribuí nas conclusões que li para a Academia no último dia 25 de setembro [de 1820].